10.19

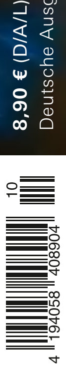
Spektrum der Wissenschaft

www.Spektrum.de 10.19

Überraschung in der Quantenwelt

Physiker finden universelle Gesetze in turbulenten Systemen

8,90 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



MEDIZIN Ein Antibiotikum als Jungbrunnen?

DELFINE Soziale Wesen mit Persönlichkeit

SPEZIAL ARKTIS Expedition ins schwindende Eis

Jetzt abonnieren!



SPEKTRUM PSYCHOLOGIE – Das Magazin für den modernen, selbstbestimmten Menschen

Verpassen Sie keine Ausgabe!
Lesen Sie 6 Ausgaben im Jahresabonnement mit einem Preisvorteil von fast 12 % gegenüber dem Einzelkauf!
Print € 31,20; Digital € 24,60; Kombiabo Print + Digital € 37,20
(Printpreise inkl. Versandkosten Inland; Digitalabo nur für Privatkunden)

Informationen und Bestellmöglichkeit:

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum-psychologie.de



EDITORIAL
DANKE

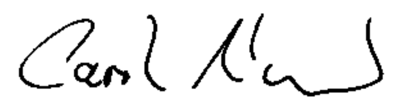
Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Wissenschaft ist wichtig. Als neugierige Wesen wollen wir verstehen, welchen Gesetzen die Welt unterliegt und wie man sie möglichst zum Guten nutzen kann. Dazu braucht es Expertise, methodisches Knowhow sowie gesellschaftlich tragbare Ziele. Damit viele Menschen Anteil daran erhalten, was Forscherinnen und Forscher herausfinden, wie sie dabei vorgehen und welche positiven wie negativen Folgen ihr Tun zeitigen könnte, gibt es Publikationen wie »Spektrum der Wissenschaft«. Seit 1978 berichten hier führende Köpfe über richtungweisende Erkenntnisse auf ihrem Fachgebiet.

Fast 20 Jahre lang hatte ich das Privileg, wichtige und interessante Themen in »Spektrum« für ein breites Publikum aufzubereiten, die letzten neun Jahre davon als Chefredakteur. Während dieser Zeit hat sich die Wissenschaftskommunikation stark verändert: Zum einen gibt es immer mehr Forschung, gemessen an der Zahl der Fachpublikationen. Zu prüfen, welche Arbeiten über den Tag und die einzelne Disziplin hinaus bedeutsam sind, wird anspruchsvoller. Zum anderen erhebt sich dank der allseits verfügbaren digitalen Möglichkeiten, öffentlich Informationen und Meinung auch zu Wissenschaftsthemen zu lancieren, inzwischen ein vielstimmiger und nicht selten verwirrend disharmonisch klingender Chor. Etliche Solisten verfolgen dabei partikulare Interessen, wollen etwa eine bestimmte Theorie oder Technologie verbreiten oder politisch Wirkung erzielen. Kritisch zu prüfen und nüchtern darzustellen, was – nach dem stets nur vorläufigen Stand der Wissenschaft – *ist*, stellt somit mehr denn je eine gesellschaftlich relevante Herausforderung dar. Dieser sind wir über die Jahre bei »Spektrum« unter anderem dadurch nachgekommen, dass wir systematisch ausbauten: unsere tagesaktuelle Berichterstattung auf »Spektrum.de«, dazu Blogs, Podcasts, Videos – all dies ist heute Ihr »Spektrum«; die Zeitschrift als solche haben wir hingegen bewusst nur sachte weiterentwickelt.

In dieser Zeit des Umbruchs durfte ich die Geschicke von »Spektrum« gemeinsam mit einem wunderbaren Team federführend gestalten. Darauf werde ich zutiefst dankbar zurückblicken, wenn ich nun eine neue Aufgabe außerhalb der Verlagswelt annehme. Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, danke ich von Herzen für Ihr treues Interesse! Von der kommenden Ausgabe an wird Ihr »Spektrum« von meinem Nachfolger und langjährigen Kollegen Daniel Lingenhöhl verantwortet. Ihm und dem bewährten Team rund um Redaktionsleiter Hartwig Hanser wünsche ich weiterhin eine gleichermaßen kreative wie ruhige Hand.

Adieu und Danke sagt
Ihr





NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Archäologie – Geschichte – Kultur 3.19 entführt Sie in die Welt des Goldes und seiner archäologischen wie kulturwissenschaftlichen Erforschung.



IN DIESER AUSGABE



FABIENNE DELFOUR

Die französische Ethologin fasst ab S. 32 zusammen, was Forscher über die Kommunikation, das Sozialverhalten und Persönlichkeitsmerkmale von Delfinen wissen.




KEVIN STRANGE UND VIRAVUTH YIN

Die amerikanischen Biologen beschreiben, wie ein antibiotischer Wirkstoff namens MSI-1436 zerstörtes Körpergewebe neu wachsen lässt (S. 40).


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / PHILIPP ROTHE

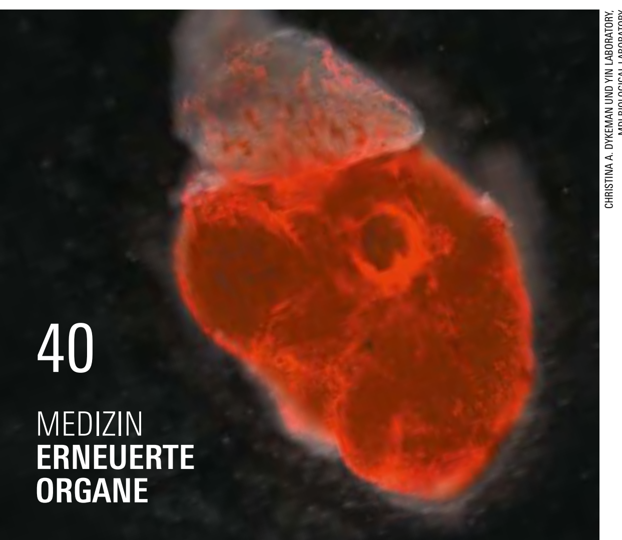
ARTHUR HEBECKER

Der Heidelberger Physiker erläutert im Interview ab S. 74 die mathematische Ästhetik der Stringtheorie und lotet aus, inwiefern man sie empirisch überprüfen kann.

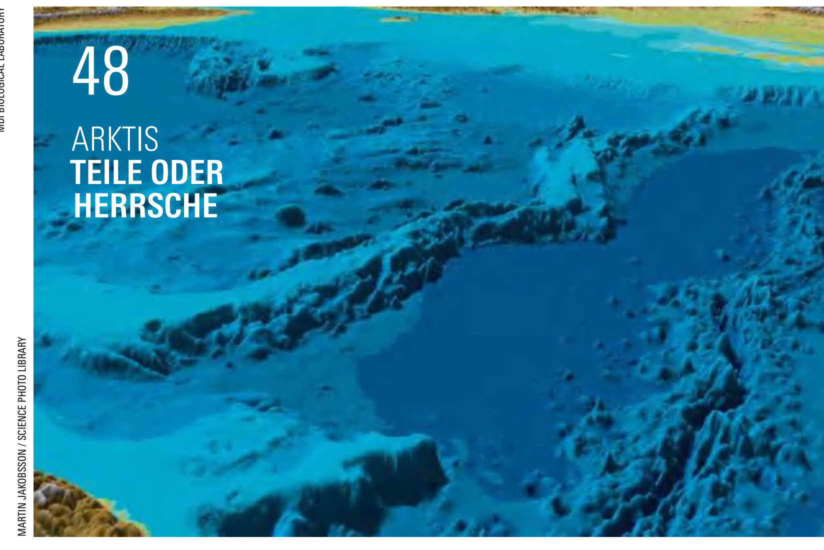
INHALT

TITELBILD: IDEAS_STUDIO / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

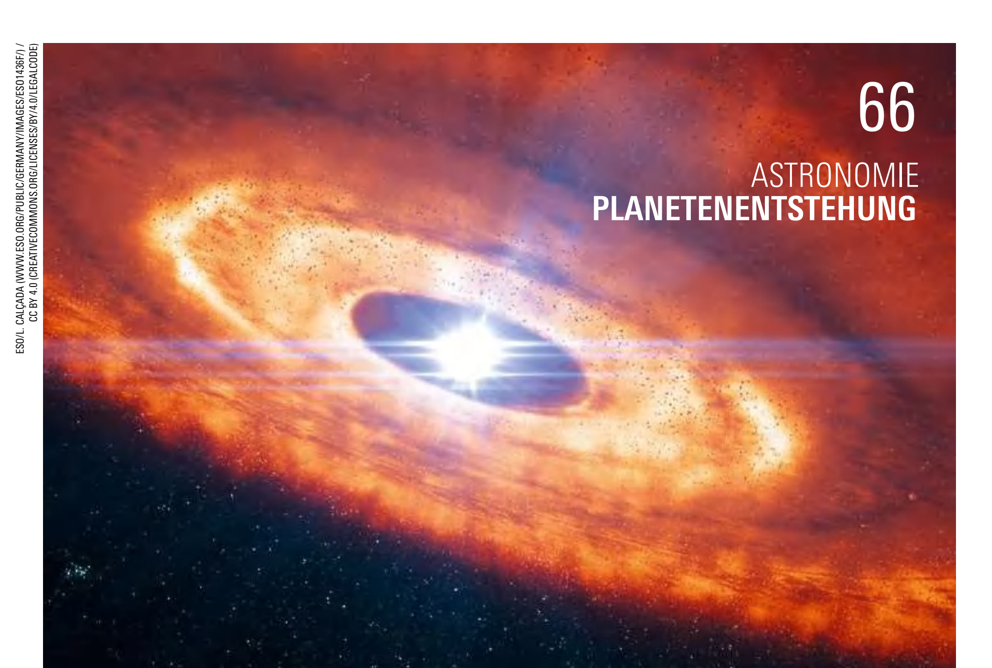
ANNA BLIOKH / GETTY IMAGES / ISTOCK



CHRISTINA A. DYKEMAN UND YIN LABORATORY, MDI BIOLOGICAL LABORATORY



MARTIN JAKOBSSON / SCIENCE PHOTO LIBRARY



ESO/L. CALÇADA (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESO1436F/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)



Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

Auf **Spektrum.de** berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.



ESA/HUBBLE & NASA, A. EVANS (WWW.SPACETELESCOPE.ORG/IMAGES/POTW1931A/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

TANZ ZWEIER GIGANTEN

Galaxien enthalten Milliarden von Sternen und erstrecken sich über hunderttausende Lichtjahre. Wenn sich zwei der Giganten in den Weiten des Alls begegnen, beginnt ein imposantes Schauspiel: Die Schwerkraft zieht die beiden immer enger zusammen, gleichzeitig verändert sich ihre Form drastisch.

Mit dem Hubble-Weltraumteleskop ist nun der Schnappschuss eines solchen Spektakels gelungen. Die Aufnahme zeigt das Galaxienduo UGC 2369, das 420 Millionen Lichtjahre entfernt von uns gerade Tuchfühlung aufgenommen hat. Die beiden Partner haben bereits große Mengen Gas ausgetauscht, die nun eine Art Brücke zwischen den Welteninseln bilden. Als Nächstes werden auch die Sterne durcheinanderwirbeln.

Mittelfristig könnten die beiden Galaxien dann zu einem noch größeren Objekt verschmelzen. Etwas Ähnliches steht dereinst auch unserer Milchstraße bevor: In rund vier Milliarden Jahren wird sie mit der benachbarten Andromeda-Galaxie kollidieren.

NASA-Mitteilung, August 2019

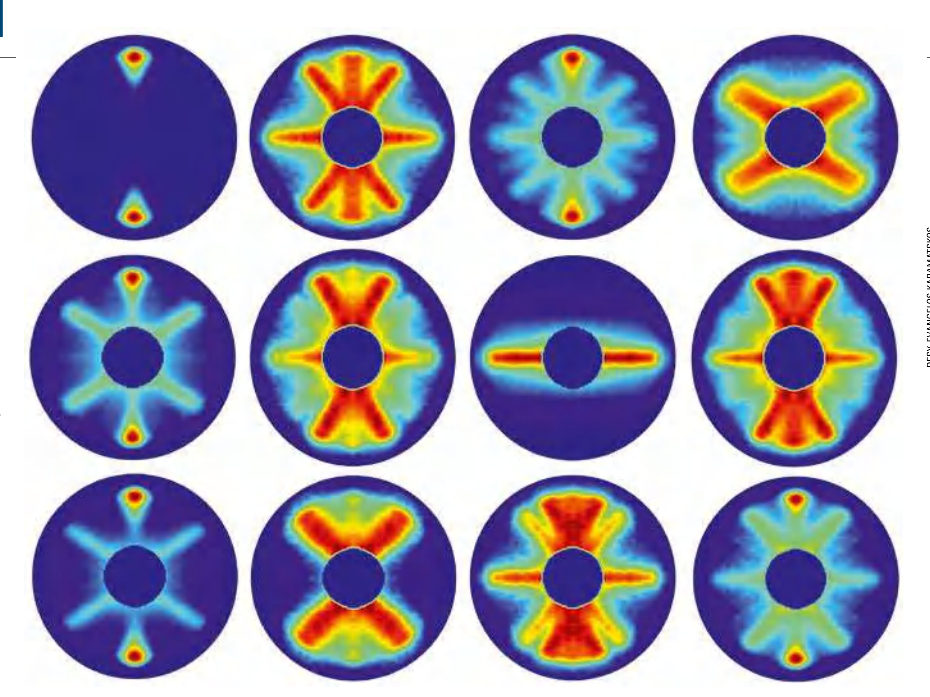
ESA/HUBBLE & NASA, A. EVANS (WWW.SPACETELESCOPE.ORG/IMAGES/POTW1931A/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

PHYSIK
FILM EINER MOLEKÜLDREHUNG

Seit Langem versuchen Physiker, die extrem flotten Bewegungen von Molekülen zu filmen. Ein Team um Jochen Küpper vom Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg hat nun ein eindrucksvolles Beispiel für ein solches »Molekülkino« präsentiert. Es zeigt, wie sich ein Carbonylsulfidmolekül (OCS), das aus einem Sauerstoff-, einem Kohlenstoff- und einem Schwefelatom besteht, während einer Drehung verändert.

Um den Film aufzunehmen, beschossen die Forscher wiederholt OCS-Moleküle mit zwei unmittelbar aufeinander folgenden Infrarot-Laserpulsen. Der erste brachte die stäbchenförmige Verbindung in Ausgangsstellung, der zweite ließ sie um ihre eigene Achse rotieren. Mit einem weiteren Laserpuls trennten die Physiker die Moleküle in zwei Teile, wobei sie die Flugrichtung der freigesetzten Sauerstoffionen erfassten.

Die Gruppe wiederholte die Messung immer wieder, sprengte die OCS-Moleküle jedoch stets etwas später. Dadurch lichtete sie den ionisierten Sauerstoff jeweils zu einem anderen Zeitpunkt ab. So entstanden 651 Einzelbilder, die zusammengesetzt eineinhalb Drehungen von Carbonylsulfid zeigen. Das Molekül benötigt dafür 125 billionstel Sekunden.



DESY, EVANGELOS KARAMATSKOS

Drehung eines OCS-Moleküls: Zu sehen sind alle Regionen, in denen sich das Sauerstoffion aufhalten kann (rot). Es bildet stets das eine Ende der stabförmigen Verbindung.

Oftmals sind die Sauerstoffionen auf den Bildern nicht genau lokalisiert; ihnen stehen mehrere »Orbitale« zur Auswahl. Verantwortlich ist die berühmte Unschärferelation von Werner Heisenberg. Ihr zufolge lassen sich Ort und Impuls eines Teilchens nicht zur selben Zeit eindeutig bestimmen; Forscher können daher nur Aufenthaltswahrscheinlichkeiten angeben.

Nature Communications 10.1038/s41467-019-11122-y, 2019

BIOCHEMIE
AMINOSÄUREN STABILISIERTEN DIE ERSTEN ZELLVORLÄUFER

Die meisten Fachleute sind sich einig, dass schon die ersten Zellvorläufer zwei wichtige Eigenschaften hatten: Sie wiesen eine Grenze zwischen innen und außen auf, außerdem enthielten sie einen Informationsträger. Bei Letzterem handelte es sich vermutlich um Moleküle der Ribonukleinsäure (RNA). Fettsäuren bildeten hingegen umschließende Hüllen, die sich in Wasser spontan zu Kugeln und hohlen Säckchen zusammenlagern.

Biochemiker argumentieren schon länger, dass diese Sichtweise auf einen Widerspruch hinausläuft: RNA benötigt Salze, um zu funktionieren. Diese lassen jedoch die schützenden Membranen zusammenbrechen. Die beiden entscheidenden Bestandteile der ersten Zellvorläufer scheinen sich also gegenseitig auszuschließen.

Möglicherweise kann die dritte Stoffklasse des Lebens, die Aminosäuren, diesen Gegensatz überbrücken, vermutet nun eine Arbeitsgruppe um Sarah Keller von der University of Washington. Das Team hat untersucht, wie drei präbiotische Aminosäuren, deren Existenz auch auf der unbelebten Erde als plausibel gilt, mit Membranen wechselwirken. Dabei stellte sich heraus, dass die Aminosäuren an die Membranbestandteile binden und sie dabei stabilisieren. Durch die Bindung reichern sich die kleinen Moleküle auf engem Raum an, was wiederum ihre Reaktion zu frühen Proteinen gefördert haben könnte, spekulieren die Wissenschaftler. Außerdem bilden die Fettsäuren in Gegenwart von Salz und Aminosäuren mehrwändige, zwiebelartige Strukturen, wie sie auch in lebenden Zellen vorkommen.

Die Mechanismen dieser Wechselwirkung sind allerdings noch unklar. Dank der neuen Erkenntnis müsse man jedoch keineswegs mehr von unwahrscheinlichen Zufällen ausgehen, um die Entstehung des Lebens zu erklären, so die Forscher. Vielmehr scheinen chemische und physikalische Notwendigkeiten den Weg gewiesen zu haben.

PNAS 10.1073/pnas.1900275116, 2019

PALÄOGENETIK

DAS GEHEIMNIS DES »KNOCHENSEES«

Nur einen Monat pro Jahr ist der Roopkund-See im Himalaja einigermaßen frei von Schnee und Eis. Dann aber bietet er Besuchern einen wahrhaft schaurigen Anblick: Tausende Knochen, teils noch mit anhaftendem Fleisch, lagern in und um den 5000 Meter hoch gelegenen Bergsee. Schätzungen zufolge starben hier viele hundert Menschen. Aber wann? Und unter welchen Umständen?

Ein internationales Team von Paläogenetikern hat nun 38 Knochenproben analysiert – und kommt damit der Lösung des Rätsels einen Schritt näher. Den Forschern zufolge stammen die Gebeine aus zwei weit auseinanderliegenden Zeiträumen. Ein Teil gehörte zu Menschen, die um das Jahr 800 lebten. Andere Knochen sind deutlich jünger, die Forscher datieren sie auf das Jahr 1800.

Eine Überraschung ist auch die Herkunft einer der Gruppen. Während viele der Toten indischer Abstammung waren, gehen die jüngeren Knochen auf Menschen aus dem östlichen Mittelmeerraum zurück. Wie diese in den Himalaja gelangten, ist allerdings völlig offen. Die Forscher hoffen, dass Aufzeichnungen in Archiven einen Anhaltspunkt liefern – dort müsste eine größere Gruppe, die im Himalaja verschollen ist, eigentlich Spuren hinterlassen haben.

Für die älteren Skelette haben die Forscher immerhin eine Theorie: Womöglich handelte es sich um Gläubige, die an dem hinduistischen Fest Nanda Devi Raj Jat teilnahmen. Der Pilgerweg verläuft in nicht allzu weiter Entfernung vom Roopkund-See. Vielleicht wurden die Wallfahrer dort von schlechtem Wetter überrascht und erfroren an der heutigen Fundstätte.

Nature Communications 10.1038/s41467-019-11357-9, 2019



PRAMOD JOGLEKAR, DECCAN COLLEGE, INDIA

Der Roopkund-See im indischen Himalaja (unten) ist seit Langem das makabare Ziel von Wandertouren: In und um den See liegen die Gebeine hunderter Menschen. Offenbar starben sie weder durch eine Epidemie noch durch ein Massaker, sondern zu verschiedenen Zeitpunkten.



ATISH WAGHWASE

BIOLOGIE
SCHWERSTER BEKANNTER PAPAGEI

Paläontologen haben in Neuseeland zwei ungewöhnlich große Unterschenkelknochen eines Vogels ausgegraben. Die Fossilien gehörten vermutlich zu einem riesigen Papagei, der vor 19 Millionen Jahren gelebt hat. Das folgert das Team um Trevor Worthy von der australischen Flinders University aus Vergleichen mit den Knochen anderer Papageien.

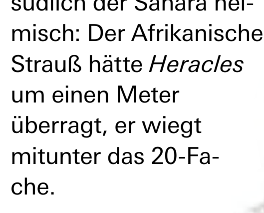
Heracles inexpectatus (benannt nach dem Sagenhelden Hercules) war demnach ungefähr einen Meter groß und brachte sieben Kilogramm auf die Waage. Er wog damit doppelt so viel wie der schwerste heute lebende Papagei, der vom Aussterben bedrohte Kakapo.

Der Fund stammt aus dem Gebiet um die ehemalige Goldgräberstadt Saint Bathans; hier buddeln Paläontologen immer wieder die Fossilien ausgestorbener Vögel aus. Die Flora und Fauna Neuseelands bot ihnen offenbar ideale Lebensbedingungen und verhalf vielen Arten zu enormem Wachstum.

Die Gruppe um Trevor Worthy vermutet, dass der nun entdeckte Riesenpapagei nicht fliegen konnte. Bei seiner stattlichen Körpergröße sollte er jedoch einen massiven, kräftigen Schnabel gehabt haben. Die Art musste sich also nicht nur von üblichem Papageienfutter wie Samen, Früchten und Insekten ernähren, sondern hätte prinzipiell auch größere Tiere fressen können, spekulieren die Forscher.

Auf anderen Inseln, etwa auf Mauritius, den Fidschi-Inseln oder Hawaii, haben sich ebenfalls gefiederte Giganten oder riesige Eulen entwickelt. Der größte heute lebende Vogel ist allerdings kein Inselbewohner, sondern südlich der Sahara heimisch: Der Afrikanische Strauß hätte *Heracles* um einen Meter überragt, er wiegt mitunter das 20-Fache.

Biology Letters 10.1098/rsbl.2019.0467, 2019



PAUL SCOFIELD, CANTERBURY MUSEUM

Der Riesenpapagei *Heracles inexpectatus* wurde bis zu einen Meter groß – und überragte damit andere Vögel beträchtlich.



BRIAN CHOO, FLINDERS UNIVERSITY

OPTIK
LÖSUNG FÜR LINSENPROBLEM

Licht am Rand einer Linse wird anders gebrochen als in der Mitte, Physiker sprechen von sphärischer Aberration. Sie sorgt dafür, dass eine Sammellinse parallel einfallende Lichtstrahlen nicht genau auf einen Punkt fokussiert. Der Effekt lässt sich ausgleichen, indem man die Linse durch optische Bauteile mit anderer Krümmung ergänzt.

Oder man entwirft am Computer eine einzelne Linse mit maßgeschneiderten Oberflächen, welche die sphärische Aberration für eine bestimmte Situation exakt ausgleichen kann. Hier die richtige Form zu finden, ist jedoch sehr aufwändig. Bisher müssen Forscher dazu Näherungsverfahren anwenden, die viel Rechenzeit beanspruchen.

Die Entdeckung dreier Physiker um Rafael G. González-Acuña vom Institut für Technologische und Höhere Studien in Monterrey, Mexiko, könnte das künftig ändern: Sie haben eine Formel gefunden, mit der man das Linsenproblem analytisch lösen kann, also sehr viel schneller und eleganter als bisher.

Der einzige freie Parameter in dem Modell ist die innere Fläche der Linse. Aus ihr kann man leicht die ideale Linsenform für eine bestimmte Abbildung berechnen. In Computersimulationen ließ sich die Aberration so komplett beseitigen. Nun hoffen die Forscher auf eine Anwendung in der optischen Industrie. Dort könnte die analytische Lösung die Herstellung von Speziallinsen vereinfachen.

Applied Optics 10.1364/AO.58.001010, 2019

ASTRONOMIE
EXOPLANET VERDAMPFT EISEN

Der Exoplanet WASP-121b ist seinem Stern so nahe, dass dessen Strahlung die Gashülle ins All bläst (Illustration).

NASA, ESA, AND J. OLMSTED (STSCI) (HUBBLESITE.ORG/IMAGE/4546/)

WASP-121b ist eine bizarre Welt. Zum einen ist der Exoplanet knapp doppelt so groß wie Jupiter. Zum anderen zieht der 900 Lichtjahre entfernte Gasriese extrem enge Bahnen um seinen Stern, was seine Gashülle auf 2100 Grad Celsius aufheizt.

Nun lassen neue Messdaten WASP-121b noch etwas extremer erscheinen. Die Hitze des nahen Sterns sorgt offenbar dafür, dass in der Atmosphäre des Planeten laufend Eisen verdampft und in großen Mengen ins Weltall strömt, berichtet ein Team um David Sing von der Johns Hopkins University in Baltimore. Die Forscher haben das ferne Sternsystem wiederholt mit dem Hubble-Weltraumteleskop beobachtet. Immer dann, wenn WASP-121b an seiner Sonne vorüberzog, zeigten sich für Eisen charakteristische Absorptionslinien im nahen Ultraviolettspektrum des Sternlichts. Diese tauchten auch in einem Abstand auf, der eigentlich außerhalb jenes Bereichs liegt, in dem die Schwereanziehung des Planeten dominiert.

Bisher haben Astronomen in den äußeren Atmosphären der allermeisten Exoplaneten nur leichtere Elemente nachgewiesen, darunter Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenstoff und Magnesium. Dass sich bei WASP-121b ebenfalls Eisen in die flüchtige Gashülle mischt, führen die Forscher auf die Nähe zu seinem Stern zurück. Der Exoplanet benötigt nicht einmal eineinhalb Tage für einen Umlauf, die Distanz entspricht lediglich acht Prozent der kürzesten Strecke zwischen Sonne und Merkur.

Dadurch erwärmt sich WASP-121b stärker als andere jupiterähnliche Planeten. Deren Inneres ist kalt genug, um Eisen zu einer Flüssigkeit kondensieren zu lassen. Es sammelt sich dann unter anderem in Wolken in den unteren Schichten der Atmosphäre. Im Fall von WASP-121b können die Metalltröpfchen jedoch verdampfen und dadurch ins Weltall aufsteigen.

The Astronomical Journal 10.3847/1538-3881/ab2986, 2019

Unsere Neuerscheinungen!

Alle Sonderhefte auch im PDF-Format



Gravitation: Gibt es die Dunkle Materie wirklich? • Sternsysteme: Der Stammbaum der Sonne • Messkampagnen: Ein Himmel voller Exoplaneten • Detektoren: Eine Falle für Axionen • Dunkle Energie: Streit um Hubbles Erbe • € 8,90



Eine kurze Geschichte des Goldes • Rheingold: Der wahre Nibelungenschatz • Qatna: Prunkvoll in die Gruft • Java: Die Herren der Goldringe • Kelten: Krieger mit Goldschmuck • Skandinavien: Die Schätze der Wikinger • € 8,90



Zukunft des Kosmos: Modelle auf dem Prüfstand • Minigalaxien: Ärger für das Standardmodell? • Dark Energy Survey: Inventur des dunklen Alls • De-Sitter-Universen: Führt die Stringtheorie ins Sumpfland? • € 5,90

Hier bestellen:
service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum.de/shop

QUANTENPHYSIK

QUANTENWELT IM NICHTGLEICHGEWICHT

Fischschwärme, Stürme, Galaxien: Fast nichts in unserer Welt ist im Gleichgewicht. Doch so alltäglich die Phänomene sind, so unverstanden sind sie noch immer. Das könnte sich nun ändern – dank neu entdeckter universeller Verhaltensmuster in Quantensystemen.



Sebastian Erne ist theoretischer Physiker an der University of Nottingham und der Technischen Universität Wien.

spektrum.de/artikel/1669374

Wie sich Systeme fern des Gleichgewichts entwickeln, können Forscher meist nicht sagen. Jetzt aber haben sie universelle Gesetzmäßigkeiten beobachtet, denen mikrophysikalische Teilchen folgen.

ANNA BLIOKH / GETTY IMAGES / ISTOCK

Blickt man auf die Entwicklung der Physik des letzten Jahrhunderts, erscheinen die Fortschritte enorm: Dank der Quantenmechanik verfügen wir über vielfältige Technologien, die etwa Laser und Mikrochips nutzen; vor wenigen Jahren gelang es Astronomen erstmals, Gravitationswellen zu detektieren; und inzwischen gibt es sogar erste Prototypen von Quantencomputern. Wenn Physiker aber die turbulenten Strömungen am Fuß eines Wasserfalls beschreiben wollen, stoßen sie an ihre Grenzen.

Geraten Vielteilchensysteme aus der Balance, lässt sich ihr Verhalten oft nicht mehr exakt berechnen. Das ist für viele Forscher frustrierend, denn die Natur steckt voller Nichtgleichgewicht: von den Bewegungen mikroskopischer Teilchen hin zu den größten galaktischen Strukturen im Universum, von der Dynamik von Fischschwärmen zu den sich ständig verändernden Netzwerken in Telekommunikation und Gesellschaft. Selbst das Leben ist ein Beispiel für ein nicht ausbalanciertes System, weil unser Körper ständig Energie mit der Umwelt austauscht.

Phänomene außerhalb des Gleichgewichts sind daher nicht nur interessant für die Grundlagenphysik, sondern auch im Bereich der Chemie, Biologie, Meteorologie, Industrie und Soziologie. Bis heute weist das Forschungsgebiet viele offene Fragen auf – insbesondere dann, wenn die Quantenmechanik ins Spiel kommt.

Denn nicht nur in klassischen Objekten wie Flüssen oder der Atmosphäre entstehen Turbulenzen. Auch mikroskopische Vielteilchensysteme können derart gestört werden, dass sie vorübergehend einen zeitlich veränderlichen Zustand annehmen, bevor sie ins Gleichgewicht zurückkehren. Aber wie, wenn überhaupt, geht dieser Prozess vonstatten? Folgt das System dabei festen Regeln, oder wird es vom Zufall dominiert?

AUF EINEN BLICK
NEUE QUANTENGESETZE

1 Forschern fällt es bis heute schwer, Phänomene außerhalb eines Gleichgewichtszustands, etwa Turbulenzen in einem Fluss, mathematisch zu beschreiben.

2 Auch Quantensysteme können interessante Zustände annehmen, wenn sie aus der Balance geraten. Wie diese genau aussehen und sich entwickeln, weiß man allerdings häufig nicht.

3 Neueste Experimente deuten darauf hin, dass Teilchen auf dem Weg zum Gleichgewicht übergreifenden Prinzipien folgen. Das eröffnet Möglichkeiten, zuvor unerreichbare Systeme im Labor zu simulieren.

Turbulente Quantenphysik

Für Physiker sind vor allem Quantensysteme spannend, die aus vielen miteinander wechselwirkenden Teilchen bestehen. Bei so vielen Freiheitsgraden scheint die Anzahl der möglichen Wege zurück ins Gleichgewicht geradezu unbegrenzt. Um vorherzusagen, wie sich ein solches System entwickeln wird, müsste man zu einem gegebenen Zeitpunkt alle mikroskopischen Details kennen und daraus ihren Verlauf berechnen – was für die meisten Systeme praktisch unmöglich ist.

Unsere Ergebnisse deuten aber darauf hin, dass es universelle Gesetzmäßigkeiten gibt, die das Verhalten von Teilchen fernab des Gleichgewichts bestimmen. Wie sich ein Quantensystem entwickelt, scheint für die meiste Zeit nur von wenigen Eigenschaften abzuhängen; die genaue mikroskopische Zusammensetzung spielt dabei offenbar keine Rolle.

Diese »Universalität« ist auch für die Gleichgewichtsphysik von großer Bedeutung. Wie Forscher herausfanden, können Vielteilchensysteme an Phasenübergängen zwischen unterschiedlichen Aggregatzuständen universellen Regeln folgen. Auf den ersten Blick völlig verschieden erscheinende Systeme können sich dabei gleich verhalten. Physiker ordnen Vielteilchensysteme daher in so genannte Universalitätsklassen ein, die ihre gemeinsamen Eigenschaften sehr genau beschreiben. Beispielsweise gehen Kosmologen momentan davon aus, dass es kurz nach dem Urknall einen Phasenübergang gab, der in derselben Universalitätsklasse liegt wie der Übergang eines Ferromagneten, der oberhalb einer gewissen Temperatur seine Magnetisierung verliert.

Sollte es auch außerhalb des Gleichgewichts universelle Gesetzmäßigkeiten geben, hätte das weit reichende Folgen. Forscher könnten Antworten auf grundlegende Fragen künftig im Labor finden, indem sie einfachere Quantensysteme aus der gleichen Universalitätsklasse untersuchen, anstatt sich den schwierigen – und wie im Fall des jungen Universums unerreichbaren – Problemen direkt zu widmen.

Doch leider ist es extrem schwierig, das Nichtgleichgewicht zu untersuchen. Denn wenn ein System aus der Balance gerät, können vielfältige Phänomene auftreten, die extrem schwer zu beschreiben sind. Ein anschauliches Beispiel dafür liefert schon der erwähnte Wasserfall, der Wirbelströmungen in einem Fluss erzeugt.

Flussabwärts, weit entfernt vom Wasserfall, strömt das Wasser ungestört mit konstanter Geschwindigkeit. Schwimmt man mit dem Fluss mit, wirkt es, als würde sich das Wasser in der unmittelbaren Umgebung überhaupt nicht bewegen. Das System ist im Gleichgewicht. Unter dem Mikroskop betrachtet sieht das aber anders aus: Die unzähligen Moleküle bahnen sich ihren Weg entlang chaotischer Pfade, mal schneller, mal langsamer. Von Ordnung ist auf dieser Skala nichts zu erkennen.

Bereits im 19. Jahrhundert erkannten Wissenschaftler, dass sich Gase und Flüssigkeiten auf mikroskopischer Ebene nur schwer analysieren lassen. Man kann unmöglich dem Zustand jedes einzelnen Teilchens folgen. Wie sich aber herausstellte, ist das gar nicht nötig. Wie genau sich ein Atom oder Molekül bewegt, ist irrelevant. Man muss nur wissen, wie wahrscheinlich es ist, ein Teilchen mit einer bestimmten Geschwindigkeit an einem gewissen Ort anzutreffen. Diese Erkenntnis begründete den Erfolg der statistischen Physik. Denn während sich der mikroskopi-

ANNA BLIOKH / GETTY IMAGES / ISTOCK

sche Zustand – das heißt die genaue Position und Geschwindigkeit jedes Teilchens – laufend verändert, sind im Gleichgewicht die Mittelwerte aller beobachtbaren makroskopischen Größen zeitlich konstant.

Rückt man näher an den Wasserfall heran, wird das Wasser unruhiger: Anfangs erkennt man kleinere Wellen, die sich irgendwann zu turbulenten Strömungen entwickeln. Um den Fluss dort zu beschreiben, braucht man einen neuen Ansatz. Da sich Physiker ohnehin bloß für die makroskopischen Eigenschaften interessieren, genügt es, mit etwas Abstand auf das System zu blicken und die einzelnen Wassermoleküle zu ignorieren. Man »zoomt« also gewissermaßen aus dem Fluss heraus und konzentriert sich auf größere Längen- und Zeitskalen.

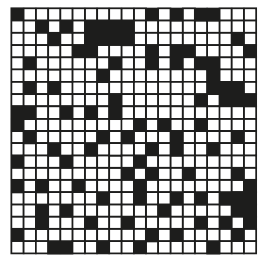
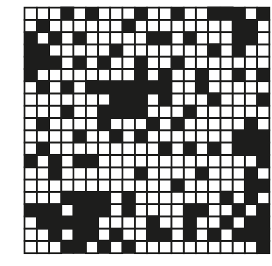
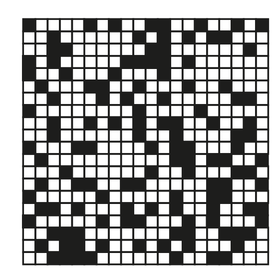
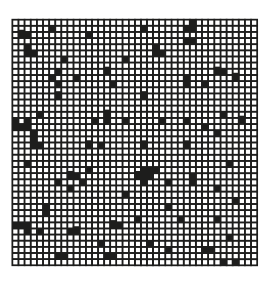
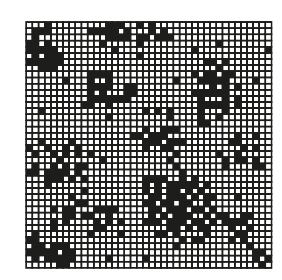
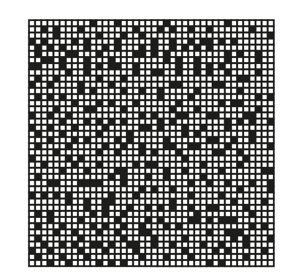
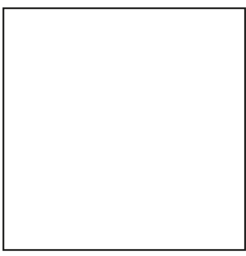
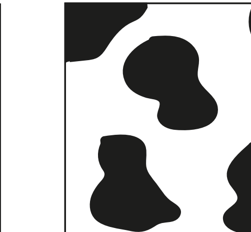
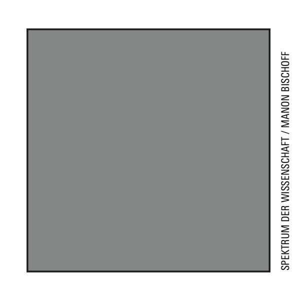
Damit lässt sich eine so genannte effektive Theorie entwickeln, die es Forschern ermöglicht, ein System auf einer bestimmten Skala zu untersuchen. Die mikroskopischen Details fließen dann als Parameter ein, deren Zahlenwerte man festlegen muss. Zum Beispiel führt man für Flüssigkeiten die Viskosität ein, um die mikroskopischen Wechselwirkungen der Moleküle zu berücksichtigen.

Claude Louis Navier und George Gabriel Stokes fanden neben anderen im 19. Jahrhundert heraus, dass sich eine Flüssigkeit auf großen Längenskalen durch die nach ihnen benannte Navier-Stokes-Gleichung beschreiben lässt. Auch wenn es sich dabei um eine effektive Theorie handelt, kann man sie über viele Größenordnungen hinweg nutzen – für kleine Wellen in der Badewanne wie für riesige Tsunamis in Ozeanen. Trotz ihrer immensen Erfolge gibt die Gleichung Wissenschaftlern noch viele Rätsel auf. Ob sie beispielsweise immer eine Lösung besitzt, zählt laut dem »Clay Mathematics Institute« zu den wichtigsten offenen Fragen der Mathematik, für deren Beantwortung eine Million US-Dollar Belohnung ausgeschrieben sind.

Zudem ergeben sich Probleme, wenn man Turbulenzen mit der Navier-Stokes-Gleichung beschreibt, denn in diesem Fall weiß man nicht, wie man sie exakt löst. Das liegt daran, dass solche Strömungen im Lauf der Zeit ihre Bewegungsenergie auf kleinsten Skalen in Wärme umwandeln. Turbulenz ist daher ein Nichtgleichgewichtsphänomen, das sich über einen großen Bereich an Skalen erstreckt.

Vor knapp 80 Jahren fiel dem sowjetischen Physiker Andrei Kolmogorow jedoch auf, dass Turbulenz in allen Fluiden gleich aussieht, unabhängig davon, ob es sich um einen Tornado in der Atmosphäre oder einen Strudel in der Badewanne handelt. Daher vermutete er, dass solche Phänomene universelle Eigenschaften besitzen: Diese hängen nicht von den mikroskopischen Details des Fluids oder der treibenden Kraft ab, die sie verursachen. Trotz etlicher Bemühungen und experimenteller Bestätigungen ist es Wissenschaftlern allerdings noch nicht gelungen, den Verdacht allgemein zu beweisen.

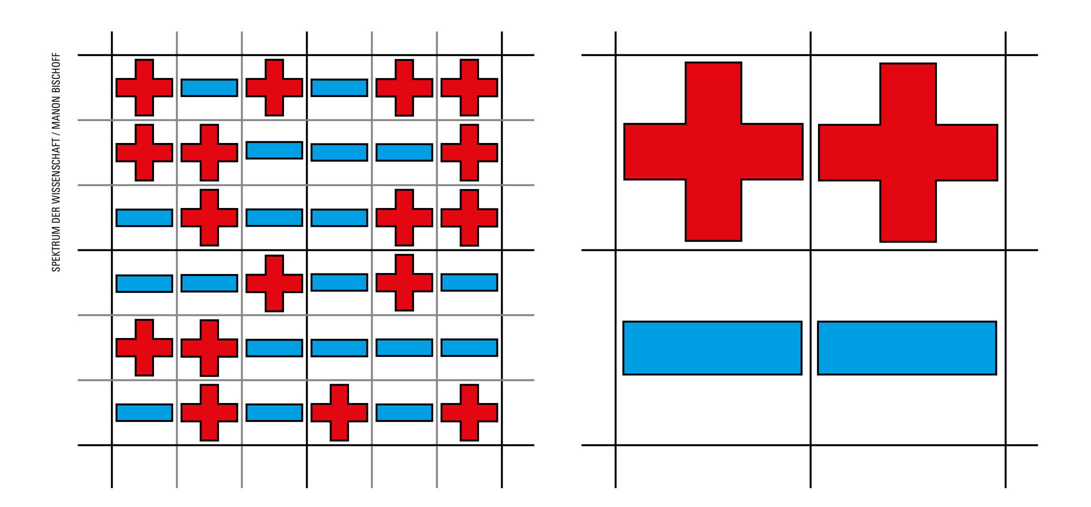
Skaleninvarianz

Auf mikroskopischer Ebene (oben) lässt sich meist nicht beurteilen, ob ein System positiv (schwarz) oder negativ (weiß) magnetisiert ist. Es lohnt sich daher, mit etwas Abstand darauf zu blicken (Mitte). Indem man schließlich ganz aus dem System herauszoomt (unten), erkennt man die makroskopische Magnetisierung.

Falls die Kopplung zwischen den Magneten oberhalb des kritischen Punkts lag (links), ist das System ferromagnetisch, die meisten Objekte sind entweder positiv oder negativ ausgerichtet. Unterhalb des kritischen Punkts (rechts) lässt sich auch mit extrem großem Abstand keine Ordnung erkennen, das System ist nicht ferromagnetisch. Am kritischen Punkt (Mitte) erscheinen auf allen Skalen etwa gleich große Bezirke, in denen die Objekte mal positiv, mal negativ magnetisiert sind. Für diese Kopplung ist das System selbstähnlich.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Bei einer Renormierungsgruppentransformation mittelt man über einzelne Bereiche eines Systems und »zoomt« heraus. Das Beispiel zeigt die Magnetisierung von sechs mal sechs Gitterplätzen (links). Das daraus entstandene neue System erscheint grobkörniger (rechts).

Dafür müsste man zuerst verstehen, warum Turbulenz auf allen Skalen gleich aussieht. Hierbei hilft die in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelte Renormierungsgruppentheorie, die wie ein mathematisches Mikroskop funktioniert: Durch sie kann man in ein System hinein- und aus ihm herauszoomen und eine Beschreibung für verschiedene Skalen finden.

Die zu Grunde liegende Idee der Methode ist für zeitlich unveränderliche Systeme wie das thermische Gleichgewicht einfach zu veranschaulichen. Betrachtet man zum Beispiel das Modell eines zweidimensionalen Ferromagneten im Gleichgewicht, also ein großes, quadratisches Gitter aus vielen einzelnen mikroskopischen Magneten, deren Nordpol entweder nach oben (positiv) oder nach unten (negativ) zeigt, lässt sich die gemittelte Magnetisierung des Systems auf einer bestimmten Skala mit Hilfe der Renormierungsgruppentheorie berechnen.

Vereinfachtes Modell eines Ferromagneten

Dazu zoomt man in einem ersten Schritt aus dem Gitter heraus, indem man beispielsweise ein Quadrat aus drei mal drei Magneten zu einem neuen Objekt zusammenfasst. Dieses ist dann entweder positiv oder negativ magnetisiert, abhängig davon, wie die Mehrheit der neun einzelnen Magnete ausgerichtet ist (siehe Bild oben). Ein Quadrat aus drei positiv und sechs negativ magnetisierten Objekten erscheint negativ magnetisiert.

Im nächsten Schritt zoomt man weiter heraus und vereinigt wieder neun neue Objekte zu einem gemittelten Magneten. Diese »Renormierungsgruppentransformation« wiederholt man so oft, bis man bei der gewünschten Größenordnung angelangt ist. Das System wird dabei immer grobkörniger.

Die Renormierungsgruppe beschreibt, wie sich die physikalischen Eigenschaften beim Herauszoomen verändern. Wenn man etwa davon ausgeht, dass die mikroskopischen Magnete mit ihren direkten Nachbarn wechselwirken, indem sie versuchen, sich jeweils gleich auszurichten, beleuchtet die Theorie, wie sich die Kopplung über verschiedene Skalen verändert.

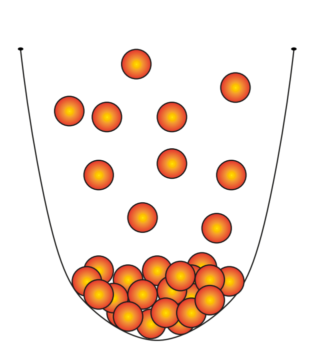
Ist die Wechselwirkungsstärke verglichen mit der äußeren Temperatur klein, führen thermische Schwankungen dazu, dass sich die Magnete zufällig ausrichten. Unabhängig davon, wie weit man aus dem System herauszoomt, kann man auf keiner Skala Ordnung erkennen. Das Gitter ist daher nicht magnetisiert.

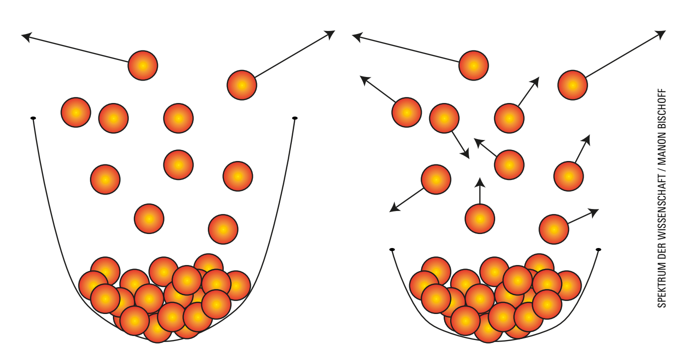
Ist die Kopplung hingegen stark, bilden sich unterschiedliche Bereiche aus, die entweder positiv oder negativ magnetisiert sind. Da positive und negative Ausrichtungen gleich wahrscheinlich sind, genügt ein winziges Ungleichgewicht, damit das Gitter bei einer sehr starken Wechselwirkung vollständig in die entsprechende Richtung magnetisiert wird. Auf mikroskopischer Skala finden sich bei endlicher Temperatur jedoch immer noch Ausreißer, die in die entgegengesetzte Richtung zeigen. Um die Gesamtmagnetisierung richtig zu deuten, muss man daher erst aus dem System herauszoomen.

Startet man mit einem Modell ohne Wechselwirkung und dreht dann die Kopplungsstärke langsam hoch, stellt sich irgendwann eine besonders interessante Situation ein. Während sich immer größere magnetisierte Zonen herausbilden, sieht das Gitter zu einem bestimmten Zeitpunkt plötzlich auf allen Skalen gleich aus. Egal wie weit man hinein- oder herauszoomt, man erkennt stets etwa gleich große Bereiche, in denen die Magnete gleich ausgerichtet sind. Diese »kritische« Wechselwirkungsstärke markiert den Übergang zwischen einem System mit und einem ohne Magnetisierung. Tatsächlich ist eine solche Skaleninvarianz – bei der etwas auf allen Größenordnungen gleich aussieht – ein typisches Merkmal von Phasenübergängen (siehe »Skaleninvarianz«, links).

Als Physiker verschiedene Phasenübergänge untersuchten, machten sie eine überraschende Entdeckung: Auch wenn einige Systeme völlig unterschiedlich sind, verhalten sie sich im Gleichgewicht in der Nähe des Phasenübergangs plötzlich gleich. Erhitzt man beispielsweise Wasser bei einem Druck von 221 Bar auf eine Temperatur von etwa 374 Grad Celsius, verändert sich die Volumendifferenz zwischen Siede- und Kondensationspunkt dabei genauso wie die Magnetisierung des zuvor beschriebenen Modells eines Ferromagneten, der oberhalb der kritischen Temperatur seine magnetischen Eigenschaften verliert. Beide Größen folgen dem gleichen Potenzgesetz: Volumendifferenz und Magnetisierung hängen jeweils nur von der Temperaturdifferenz zur kritischen Temperatur hoch einem »kritischen« Exponenten ab.

Eine magnetische Falle hält Atome gefangen, wobei langsame Teilchen sich unten sammeln und schnellere oben herumschwirren (links). Wenn man die Tiefe der Falle verringert (Mitte), können die schnellen Atome entweichen. Dadurch kühlt ein Quantengas extrem schnell ab (rechts).





SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Vielteilchensysteme lassen sich daher nahe dem Gleichgewicht in Universalitätsklassen einteilen, die unter anderem durch die kritischen Exponenten bestimmt sind. Zwei Systeme aus der gleichen Klasse verhalten sich bei einem Übergang zwischen zwei Aggregatzuständen gleich.

Es mag auf den ersten Blick seltsam erscheinen, dass sich Phasenübergänge durch die Sprache der Gleichgewichtsphysik beschreiben lassen. Doch Forscher ignorieren meist die möglichen kurzzeitigen Nichtgleichgewichtszustände und geben einem System nach jeder Veränderung genug Zeit, um sich auszubalancieren. Möchten sie beispielsweise den Übergang von einem Ferromagneten beschreiben, kühlen sie ihn langsam genug ab, damit sich das Material jederzeit im Gleichgewicht befindet.

Lässt man die Temperatur dagegen schlagartig unter den kritischen Punkt fallen, können sich die mikroskopischen Magnete nicht schnell genug ausrichten; das Material erscheint kurzzeitig weiterhin vollständig unmagnetisiert, ähnlich einer Zeichentrickfigur, die gar nicht merkt, dass sie über einen Abgrund gerannt ist, und daher noch kurz in der Luft schwebt, bevor sie fällt. Ob bei solchen plötzlichen Übergängen zu Zuständen außerhalb des Gleichgewichts auch universelle Gesetzmäßigkeiten auftreten – und wenn ja, welche –, weiß man im Allgemeinen nicht.

Wissenschaftler interessieren sich dabei besonders für Quantensysteme. Denn die unintuitiven Regeln der Quantenmechanik beeinflussen nicht nur das mikroskopische Verhalten der Teilchen, sondern wirken sich auch auf die makroskopischen Eigenschaften eines Systems aus.

Kühlt man beispielsweise Atome auf Temperaturen fast bis auf den absoluten Nullpunkt von –273,15 Grad Celsius ab, findet ein seltsamer Phasenübergang statt: Plötzlich verlieren die Teilchen ihre individuellen Eigenschaften; sie bilden ein so genanntes Bose-Einstein-Kondensat. Die Gesamtheit der Atome verhält sich dann wie ein einzelnes riesiges Quantenobjekt, das sich durch eine einzige Wellenfunktion beschreiben lässt. Diese stellt ein Maß für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Teilchen dar.

Experimente mit Spin

Ein Team um Markus Oberthaler untersuchte an der Universität Heidelberg ein Quantengas, in dem die Spins der Atome alle in die gleiche Richtung zeigten. Als die Physiker das äußere Magnetfeld schlagartig änderten, wechselten auch die Atome ihre magnetische Ausrichtung, verweilten dabei aber an Ort und Stelle. Indem die Forscher anschließend für verschiedene Zeiten den Zustand des Systems bestimmten, konnten sie dessen Entwicklung ins Gleichgewicht beobachten.

Wie bei unseren Experimenten in Wien folgte die Entwicklung des Quantengases für unterschiedliche Anfangsbedingungen einer universellen Funktion und wurde durch zwei Exponenten charakterisiert. Ihre Zahlenwerte lassen sich nicht genau erklären, weil das System nahezu eindimensional ist, wofür es noch keine theoretischen Vorhersagen gibt. Da die Exponenten jedoch auch bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen gleich bleiben, ist die beobachtete Entwicklung höchstwahrscheinlich universell.

Flickenteppich im Ungleichgewicht

Durch Experimente mit solchen »ultrakalten Atomen« konnten Physiker in den letzten Jahrzehnten unterschiedlichste Systeme untersuchen, von neuartigen Supraleitern über topologische Materie bis hin zu den ersten Quantencomputern. Viele spannende Phänomene sind bereits im Gleichgewicht möglich. Daher fragen sich Physiker, was passiert, wenn man Quantensysteme aus der Balance bringt.

Theoretiker gehen schon länger davon aus, dass es auch in solchen Fällen universelle Gesetzmäßigkeiten gibt. Zum Beispiel zeigten der britische Forscher Sir Thomas Walter Bannerman Kibble und sein polnisch-amerikanischer Kollege Wojciech Hubert Zurek in den 1980er Jahren, dass während der Entwicklung an einem Phasenübergang sehr interessante Phänomene auftreten können: Gibt es etwa verschiedene mögliche Gleichgewichtszustände, in die sich ein System nach einem Phasenübergang entwickeln kann, entstehen wie bei einem Flickenteppich mehrere räumlich getrennte Bereiche mit diesen jeweils unterschiedlichen Zuständen.

Eine solche Situation tritt im zuvor geschilderten Modell eines Ferromagneten auf. Wenn die Kopplung zwischen den mikroskopischen Magneten von einem sehr kleinen zu einem sehr großen Wert anwächst, dann gibt es einen Ort, an dem sich die positive Magnetisierung durchsetzt. Während sich in dessen Umgebung immer mehr Magnete gleich

ausrichten, können sich die Objekte an einer weiter entfernten Stelle umgekehrt anordnen. Der Grund dafür ist, dass sich die Magnete nur mit endlicher Geschwindigkeit beeinflussen. Daher merken die Objekte am einen Ort zunächst nichts von der Ausrichtung derer, die weiter weg liegen. Im Gitter bilden sich dann mehrere so genannte weisssche Bezirke mit unterschiedlichen Magnetisierungen aus.

Zwischen zwei verschiedenen weissschen Bezirken gibt es keinen stetigen Übergang, stattdessen erfolgt der Wechsel abrupt: An einem Punkt zeigt der Nordpol noch nach oben, einen Gitterplatz weiter ist er schon nach unten gerichtet. Solche »Unebenheiten« nennen Physiker einen Defekt.

Wie Zurek und Kibble erkannten, hängt die Anzahl der Defekte davon ab, wie schnell ein Phasenübergang überschritten wird. Je rascher der Wechsel vonstattengeht, desto weniger Zeit haben die Teilchen, sich gegenseitig zu beeinflussen. Daher entstehen bei schnelleren Übergängen viele unterschiedliche Zonen, während es bei langsamen nur wenige sind. Ihre genaue Anzahl wird durch ein Potenzgesetz beschrieben, das so genannte Kibble-Zurek-Skalierungsverhalten, dessen Exponent universell ist und daher nicht von den mikroskopischen Details eines Systems bestimmt wird. Diese Universalität hängt jedoch von den Eigenschaften am Phasenübergang des Systems im Gleichgewicht ab.

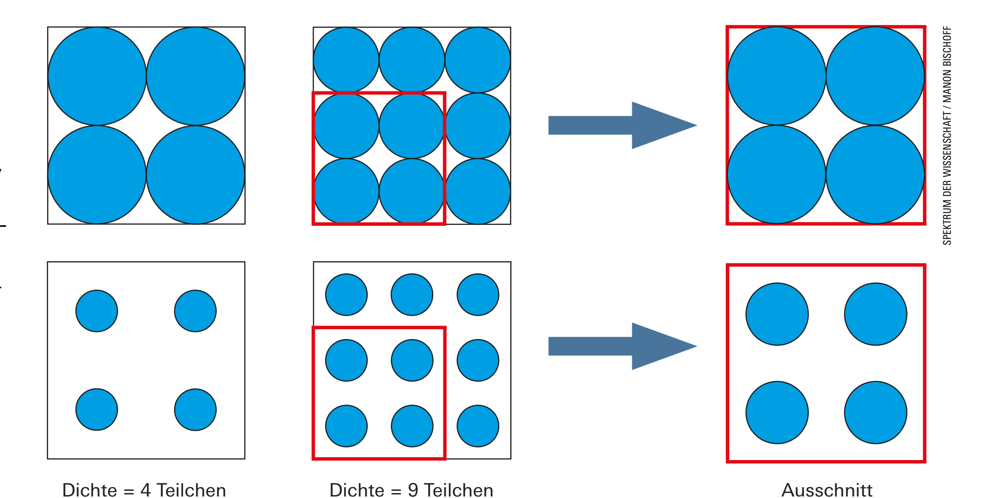
Doch warum ist es so schwer zu beweisen, dass es auch im Ungleichgewicht – weit entfernt von den kritischen Punkten eines Phasenübergangs – universelle Prinzipien gibt? Tatsächlich bedurfte es bereits großer Anstrengungen, Universalität in ausbalancierten Systemen nachzuweisen; und im Nichtgleichgewicht ist das noch komplizierter.

Maximale Abstoßung

Die Arbeitsgruppe um Zoran Hadzibabic von der University of Cambridge untersuchte ein Quantengas, das die Forscher aus dem Gleichgewicht brachten, indem sie schlagartig die Wechselwirkung zwischen den Atomen veränderten. Anschaulich kann man sich die Teilchen wie kleine Bälle vorstellen, deren Größe angibt, wie nahe sie sich kommen können, bevor sie voneinander abgestoßen werden. Der Radius des Balls entspricht der so genannten Streulänge.

Durch externe Magnetfelder konnten die Forscher die Streulänge so stark vergrößern, dass die Atome ihren Abstand maximieren. Die Kugeln grenzen in diesem Bild alle aneinander, unabhängig von der Dichte des Gases. Dadurch ist das System skaleninvariant: Es sieht auf allen Skalen gleich aus, wenn man es geeignet »reskaliert«, das heißt durch eine Funktion teilt, die von der Dichte abhängt.

Denn die Teilchendichte des Gases wirkt wie der Regler eines Mikroskops: Packt man die Atome dichter, fällt die maximale Streulänge kleiner aus, und es wirkt, als hätte man aus dem System herausgezoomt. Verringert man die Dichte dagegen, ist die Streulänge größer, und das System erscheint wie auf kleinerer Skala.



Wenn die Streulänge der Teilchen maximal ist (obere Reihe), wirkt die Dichte wie der Regler eines Mikroskops: Packt man mehr Objekte auf gleichen Raum, ist es, als hätte man aus dem System herausgezoomt (Mitte). Indem man bloß einen Ausschnitt betrachtet (rechts), erscheint das System wieder wie zuvor (links) – es ist also selbstähnlich. Wenn die Teilchen eine kleinere Streulänge haben, ist das nicht der Fall (untere Reihe).

Um diese Selbstähnlichkeit experimentell zu überprüfen, veränderten die Physiker die Dichte des Quantengases um nahezu eine Größenordnung, wobei sie die Wechselwirkungsstärke auf »unendlich« geregelt hielten, und beobachteten die zeitliche Entwicklung des Systems.

Das Quantengas verhielt sich dabei immer gleich: Alle gemessenen Daten folgen ein und derselben Kurve, wenn man Größen wie Länge und Zeit mit der entsprechenden Dichte reskaliert.

Als die Forscher den Versuch bei höheren Temperaturen wiederholten, fanden sie nochmals universelle Regeln. Durch die Temperatur erhält das System aber neben der Dichte des Gases eine zweite relevante Längenskala, die man bei der Reskalierung berücksichtigen muss. Richtig kombiniert, folgen die Messergebnisse wieder einer universellen Kurve.

Physiker kennen zwar die Gleichungen, welche die Entwicklung der Systeme in solchen Situationen beschreiben, aber meist sind sie so komplex, dass man sie nicht exakt lösen kann. Selbst mit modernsten Supercomputern erreicht man in der Vielteilchen-Quantenphysik schnell die Grenzen des Berechenbaren, so dass sich nicht genau vorhersagen lässt, was in solchen Systemen vor sich geht.

Gäbe es im Ungleichgewicht tatsächlich universelle Gesetzmäßigkeiten, wie Kolmogorow bereits für Fluide vermutete, wäre das für Wissenschaftler ein Grund zum Jubeln. Denn einige Modelle deuten darauf hin, dass auch das junge Universum übergreifenden Regeln folgte. Anstatt es also mit aufwändigen Computersimulationen zu modellieren – was, wenn überhaupt, nur unter extremen Vereinfachungen gelingt –, könnten Forscher auf ein Quantensystem der gleichen Universalitätsklasse zurückgreifen und dieses beispielsweise im Labor mittels kalter Quantengase untersuchen.

Lange Zeit war auch das kaum zu bewerkstelligen, da es extrem schwierig ist, Experimente an Quantensystemen durchzuführen. Ein Grund dafür ist, dass sie sehr empfindlich sind. Geraten mikroskopische Teilchen in Kontakt mit anderen Objekten, verlieren sie schnell ihre eigentümlichen quantenphysikalischen Eigenschaften.

Glücklicherweise haben Physiker in den letzten Jahren große Fortschritte auf diesem Gebiet gemacht. Inzwischen können sie komplizierte Quantensysteme genau untersuchen, indem sie Atome auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt abkühlen. Unter diesen Bedingungen lassen diese sich sehr genau kontrollieren: Mit Hilfe von Lasern und elektromagnetischen Feldern können Wissenschaftler die Bewegungen und Wechselwirkungen der Atome steuern und dadurch einfache Modellsysteme bilden, um fundamentale quantenphysikalische Fragen zu beantworten.

Abgeschreckte Quantensysteme

Ultrakalte Atome eignen sich hervorragend, um Phänomene fernab des Gleichgewichts zu studieren. Dazu »schrecken« Forscher sie ab, etwa indem sie sie schlagartig abkühlen oder die Wechselwirkungsstärke zwischen den Atomen rapide verstellen. Die Teilchen können der abrupten Änderung nicht folgen und geraten aus dem Gleichgewicht.

Zusammen mit den Experimenten meiner Kollegen an der Ruprecht-Karls-Universität in Heidelberg liefern unsere Ergebnisse aus dem Labor an der Technischen Universität Wien erste Hinweise darauf, dass es im Reich der Quantenphysik auch fernab des Gleichgewichts universelle Regeln gibt, denen die Vielteilchensysteme folgen.

Thermische und nichtthermische Fixpunkte

Die Renormierungsgruppe beschreibt, wie die physikalischen Größen eines Systems von der Skala abhängen, auf der man es betrachtet. Kennt man den Zustand auf einer bestimmten Längenskala, etwa der mikroskopischen, funktioniert die Renormierungsgruppe wie ein Mikroskop: Man kann in das System hinein- und aus ihm herauszoomen und erhält für jede gewünschte Größenordnung eine effektive Theorie. Die Renormierungsgruppe gibt außerdem an, wie sich die Parameter der effektiven Theorie beim Hinein- und Herauszoomen ändern. Ein Beispiel dafür ist die Kopplungsstärke der mikroskopischen Magnete im Modell eines Ferromagneten.

Wenn die Wechselwirkungsstärke oberhalb des kritischen Punkts liegt, erscheint die Magnetisierung nach jeder Renormierungsgruppentransformation deutlicher. Indem man immer weiter herauszoomt, mittelt man über die Ausrichtung der Magnete. Je mehr Transformationsschritte man durchführt, desto genauer zeichnet sich die Magnetisierung ab, bis irgendwann alle Objekte gleich ausgerichtet sind. Die effektive Kopplung ist an diesem Punkt unendlich. Das heißt: Wenn die Kopplungsstärke oberhalb des kritischen Punkts liegt, rückt die Wechselwirkung mit jeder Renormierungsgruppentransformation näher an unendlich.

Liegt die Kopplung hingegen unterhalb des kritischen Punkts, ist das Gegenteil der Fall: Je weiter man herauszoomt, desto zufälliger erscheinen die Ausrichtungen der Objekte. Irgendwann wirkt es, als würden die Magnete überhaupt nicht wechselwirken. In diesem Fall fließt die effektive Kopplungsstärke in die entgegengesetzte Richtung, nämlich zu null.

Doch was passiert am kritischen Punkt? Das System sieht auf allen Skalen gleich aus, daher erscheint auch die Kopplungsstärke immer gleich – sie fließt nirgendwo hin. Physiker sprechen von einem Fixpunkt der Renormierungsgruppe. Fixpunkte weisen häufig auf Phasenübergänge hin, da Vielteilchensysteme in solchen Situationen selbstähnlich sind.

Allerdings gibt es zwei verschiedene Arten von Fixpunkten. Als »thermisch« gelten solche, die an gewöhnlichen Phasenübergängen im Gleichgewicht zu finden sind. Die Entwicklung eines Systems wird dabei durch äußere Parameter gesteuert, etwa durch eine Veränderung der Temperatur oder der Wechselwirkungsstärke.

Dagegen entwickeln sich Systeme, die ins Ungleichgewicht katapultiert wurden, von ganz allein in einen neuen, universell veränderlichen Zustand. Der »Fluss« der physikalischen Größen, etwa der Kopplungsstärke, ist also zeitlich bestimmt. In der Nähe dieser so genannten nichtthermischen Fixpunkte ist die Entwicklung in Raum und Zeit selbstähnlich. Das bedeutet: Das System erscheint zu einem späteren Zeitpunkt so, als ob man es in einer größeren oder kleineren Auflösung betrachten würde.

In unserem Versuch, den Jörg Schmiedmayer leitete und dessen Resultate 2018 im Fachmagazin »Nature« erschienen, hielten wir ein Quantengas aus Rubidiumatomen in Form einer Zigarre in einer magnetischen Falle auf einem so genannten Atom-Chip gefangen. Spezielle Leiterbahnen auf diesem Chip sorgen dafür, dass sich die Teilchen bloß entlang einer »langen« Richtung erstrecken, in radialer Richtung können sie sich hingegen kaum ausbreiten. Man kann sich eine solche Falle als einen Becher vorstellen, an dessen Boden sich die langsamsten Atome sammeln, während höher schnellere Teilchen herumschwirren. Durch hochfrequente elektromagnetische Felder lässt sich steuern, wie »tief« die Falle ist, das heißt, bis zu welcher Geschwindigkeit die Teilchen gefangen gehalten werden.

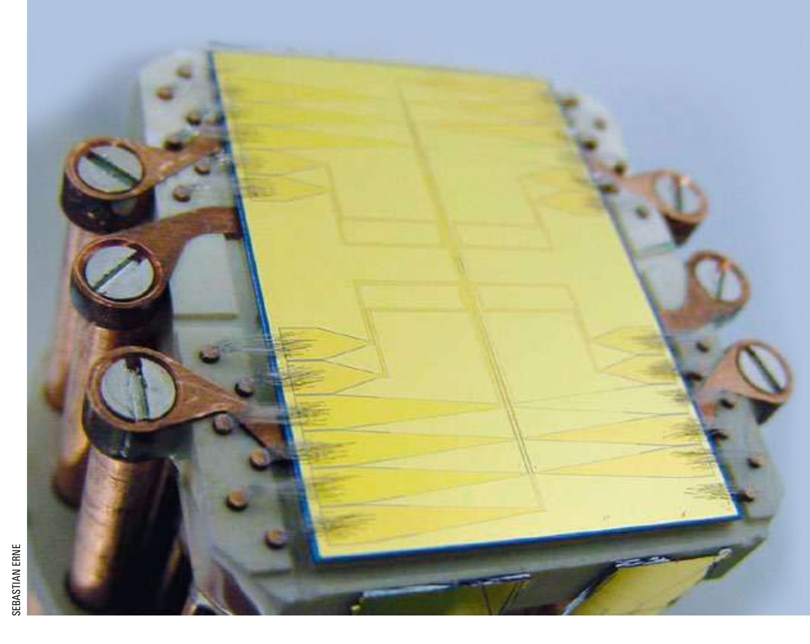
Wir kühlten das System bis knapp oberhalb der kritischen Temperatur ab, also kurz bevor ein Bose-Einstein-Kondensat entsteht. In diesem Zustand gibt es immer noch viele Atome, die sich schnell bewegen. Um das Quantengas aus dem Gleichgewicht zu bringen, wollten wir die Temperatur schlagartig unter den kritischen Punkt drücken. Dazu verringerten wir die Tiefe der magnetischen Falle, so dass die schnellen Atome entweichen konnten, während die langsamen gefangen blieben.

Würde man die Temperatur langsam verringern, entstünde ein gleichmäßiges Bose-Einstein-Kondensat, in dem sich alle Teilchen durch eine gemeinsame quantenmechanische Wellenfunktion beschreiben lassen. In unserem Experiment hatte das Quantengas jedoch keine Zeit, sich auszubalancieren. Es bildeten sich an mehreren Orten jeweils unabhängig voneinander Bose-Einstein-Kondensate aus. Diese müssen nicht identisch sein: Ihre Wellenfunktionen können sich in der Phase unterscheiden, die eine ähnliche Rolle einnimmt wie die Ausrichtung der mikroskopischen Magnete in einem Ferromagneten.

An der Grenze zwischen zwei Zonen unterschiedlicher Phasen entstehen daher Defekte, wie es Kibble und Zurek vorhergesagt hatten. Dort nimmt die Wellenfunktion einen extrem kleinen Wert an, das heißt, es tauchen kaum Teilchen an solchen Übergängen auf. Tatsächlich verhält sich diese Lücke wie eine stabile Welle, ein so genanntes Soliton. Solche Wellen können lange Zeit existieren, ohne zu zerfließen. Ein klassisches Beispiel dafür ist ein Tsunami.

Um den Anfangszustand fernab des Gleichgewichts in unserem Experiment zu verstehen, untersuchten wir in einem ersten Schritt die Defekte im Quantengas direkt nach der Kühlung. Weil die Solitonen weniger als einen Mikrometer groß sind, war es allerdings nicht möglich, die Dichteschwankungen direkt mit unserer Kamera aufzunehmen. Daher entwickelten wir ein Modell, das beschreibt, wie Solitonen die Geschwindigkeit der ultrakalten Atome beeinflussen. Wir mussten also bestimmen, wie schnell sich die Atome bewegen, um auf die Form und Anzahl der Defekte zu schließen.

Doch wie misst man die Geschwindigkeitsverteilung eines Quantengases? Dafür mussten wir die magnetische Falle ausschalten, wodurch alle Atome entweichen und sich ausbreiten. Je schneller sie sind, desto weiter entfernen sie sich von der Falle, bis wir sie messen. So gelang es uns, die Solitonen aufzuspüren.



SEBASTIAN ERNE

Physiker an der TU Wien fangen Atome mit diesem Chip von 25 mal 30 Millimetern Größe. Die darauf befindlichen Leiterbahnen kontrollieren die Falle, welche die Atome am Davonfliegen hindert.

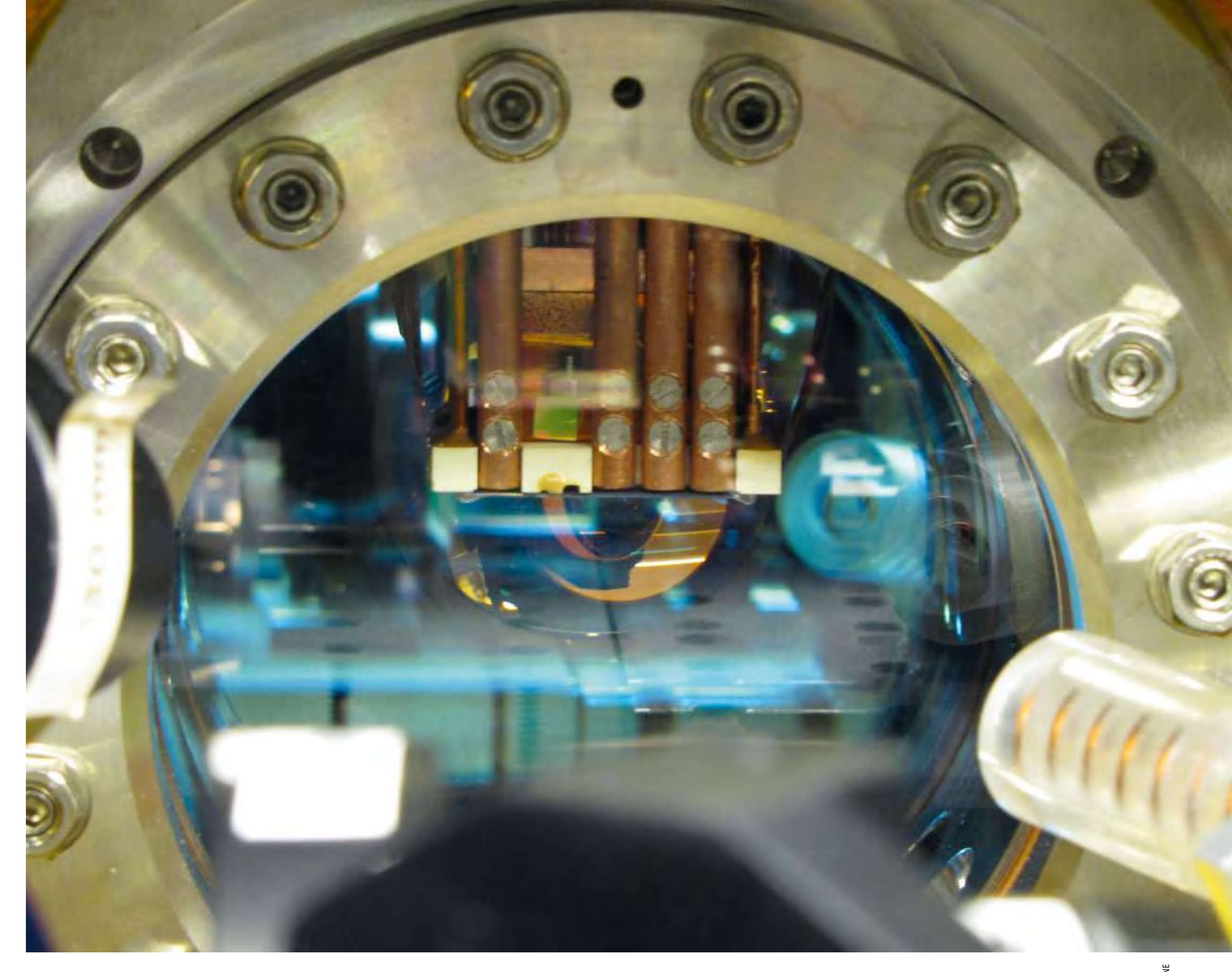
Physiker in Trient hatten unter der Leitung von Gabriele Ferrari bereits 2013 ein ähnliches Experiment durchgeführt. Sie kühlten das Gas jedoch deutlich langsamer ab und fanden daher etwa 100-mal weniger Solitonen als wir. Zudem detektierten sie die Defekte auf andere Weise: Anstatt sie über die Geschwindigkeitsverteilung der Atome zu bestimmen, maßen sie die Teilchendichte des Quantengases. Im Gegensatz zu uns konnten die Forscher das nicht direkt nach dem Temperaturabfall tun, sondern mussten etwas Zeit vergehen lassen, in der sich das System weiterentwickelt und die Solitonen zerfallen können.

Zusammengequetschte Solitonen im Quantengas

Überraschenderweise passten unsere Resultate außerordentlich gut zu den theoretischen Vorhersagen, was wir nicht erwartet hatten. Denn wir kühlten das Quantengas teilweise so schnell ab, dass es praktisch augenblicklich aus dem Gleichgewicht geriet. Ein solcher Fall wurde auf theoretischer Seite aber gar nicht behandelt. Das deutet darauf hin, dass der Kibble-Zurek-Mechanismus über einen größeren Bereich an Kühlraten funktioniert als gedacht. Das verdeutlicht ein typisches Merkmal universeller Phänomene: Weil nur wenige relevante Eigenschaften ein System charakterisieren, sind die theoretischen Modelle häufig über die erwarteten Rahmenbedingungen hinaus gültig.

Trotz der guten Übereinstimmung erschienen die Defekte zu schmal – sie hatten nur ein Drittel der erwarteten Breite. Unserer Ansicht nach kühlte das Quantengas so schnell ab, dass die vielen dadurch entstehenden Solitonen nicht genug Platz fanden, um sich ganz auszubreiten, und daher deformiert auftraten. Wir glauben, dass das in unserem Experiment den Übergang zu einem Zustand fernab des Gleichgewichts kennzeichnet.

Im zweiten Teil des Experiments gingen wir über die Universalität am Phasenübergang hinaus und wollten



Um Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt zu erreichen, trennt man Atome durch eine etwa 15 bis 20 Zentimeter große Vakuumkammer von der Umwelt. Elektromagnetische Felder fangen die Teilchen knapp unterhalb des Chips. Der Aufbau besteht aus mehreren hundert speziell dafür gefertigten Teilen.

SEBASTIAN ERNE

herausfinden, wie sich das aus dem Gleichgewicht gebrachte Vielteilchen-Quantensystem zeitlich entwickelt. Wird es einen Weg zurück ins Gleichgewicht finden? Und wenn ja, welchen wird es wählen? Um diese Fragen zu beantworten, beobachteten wir das abgekühlte Quantengas über verschiedene Zeiträume und ermittelten dabei jeweils dessen Zustand.

Wenn Kompliziertes allmählich einfach wird

Dafür brauchten wir wieder die Geschwindigkeitsverteilung der Atome. Das heißt, wir mussten für jede Messung die Falle ausschalten, wodurch wir das Bose-Einstein-Kondensat unwiederbringlich zerstörten, und danach wieder von vorn beginnen: die Atome fangen, plötzlich abkühlen, etwas Zeit verstreichen lassen, die Falle abschalten und die Bewegung der Teilchen aufzeichnen.

Das wiederholten wir etwa 40- bis 50-mal – für jeden der 50 verschiedenen Zeiträume und mit drei unterschiedlichen Teilchen- und Defektzahlen, so dass wir den Versuch etwa 7500-mal durchführten.

Die Mühe hat sich gelohnt. Wir konnten bestimmen, wie sich die Geschwindigkeitsverteilung im Quantengas zeitlich verändert. Und tatsächlich legen die Atome in den ersten 100 Millisekunden ein universelles Verhalten an den Tag: Die zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit lässt sich in diesem Zeitraum unabhängig von den Anfangsbedingungen durch eine einzige Kurve sowie zwei universelle Exponenten beschreiben.

Um diese universelle Kurve zu erkennen, mussten wir unsere Ergebnisse allerdings »reskalieren«. Das bedeutet, wir mussten die Kurve sowie die Geschwindigkeiten, von denen sie abhängt, durch je eine zeitabhängige Potenzfunktion teilen. Diese Reskalierung, und daher die gesamte Zeitentwicklung der Geschwindigkeitsverteilung, ist damit durch zwei universelle Exponenten bestimmt.

Anders als bei Phasenübergängen im Gleichgewicht ändern sich die Messgrößen also nicht durch eine Variation der Temperatur oder der Wechselwirkungsstärke, sondern von ganz allein, während die Zeit vergeht. Das heißt, das System findet auch ohne äußere Stimulation seinen Weg zu den sich universell entwickelnden Zuständen.

Die in unseren Experimenten beobachtete Universalität macht es sehr viel einfacher, das aus der Balance gebrachte Quantengas mathematisch zu beschreiben. Seine zeitliche Entwicklung hängt in diesem Fall nur noch von der Geschwindigkeit der Atome, der verstrichenen Zeit und den universellen Exponenten ab. Alle weiteren Größen des Systems sind in den ersten 100 Millisekunden nach dem Abkühlen irrelevant.

Wir konnten die gemessenen Werte der universellen Exponenten bisher jedoch noch nicht durch ein theoretisches Modell erklären. Da das Quantengas fast eindimensional ist, hätten wir erwartet, dass die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen zu jeder Zeit gleich ist und die Exponenten daher verschwinden.

Stellt man sich aneinandergereihte Billardkugeln in einem geschlossenen Rohr vor, die immer wieder zusammenstoßen, wird sich die Geschwindigkeitsverteilung niemals ändern. Der Grund dafür ist, dass die Kugeln bloß zentral aufeinandertreffen. In zwei oder drei Dimensionen ist das anders: Eine Kugel kann unter verschiedenen Winkeln mit einer ruhenden kollidieren, wonach beide in Bewegung sind. Die Geschwindigkeitsverteilung sieht dann nach dem Stoß anders aus als vorher. In Wirklichkeit ist unser Quantengas aber nicht völlig eindimensional, sondern die Atome breiten sich in der zigarrenförmigen Falle auch in radialer Richtung etwas aus. Wir vermuten, dass die universellen Exponenten deshalb einen kleinen, von null verschiedenen Wert annehmen.

Universelle Regeln bestimmen den Weg zurück ins Gleichgewicht

Insgesamt deuten unsere Ergebnisse darauf hin, dass Vielteilchen-Quantensysteme auf ihrem Weg ins Gleichgewicht über einen langen Zeitraum universellen Regeln folgen. Ein weiteres Experiment, das an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg stattfand und dessen Resultate zeitgleich mit unseren veröffentlicht wurden, bekräftigt diese Vermutung.

Die Heidelberger Kollegen um Markus Oberthaler untersuchten ebenfalls ein fast eindimensionales Quantengas, in welchem sie jedoch nicht die Bewegung der Teilchen bestimmten, sondern deren magnetische Eigenschaften. Indem sie durch äußere Einwirkung die Spinausrichtungen der Atome schlagartig gegeneinander verdrehten, brachten sie das System aus dem Gleichgewicht. Obwohl es sich dabei um völlig andere Messgrößen handelt und durch ihre Störung keinerlei Defekte auftreten, sind ihre Ergebnisse den unseren erstaunlich ähnlich. Als die Forscher den Übergang zurück ins Gleichgewicht beobachteten, erkannten sie ebenfalls – nach entsprechender Reskalierung durch eine Potenzfunktion mit zwei universellen Exponenten – eine universelle Kurve, die wie in unserem Fall nicht von den genauen Anfangsbedingungen abhängt. Die experimentell ermittelten Werte der Exponenten weichen allerdings von den unseren ab. Das deutet darauf hin, dass wir zwei verschiedene Universalitätsklassen untersucht haben.

Ebenfalls 2018 führte auch ein drittes Team von Wissenschaftlern um Zoran Hadzibabic an der University of Cambridge in England ein Experiment an Quantensystemen außerhalb des Gleichgewichts durch. Sie nutzten ein Bose-Einstein-Kondensat, bei dem sie schlagartig die Abstoßung zwischen den Atomen so stark erhöhten, wie es die Gesetze der Quantenmechanik zulassen. Die Teilchen versuchen daraufhin, den Abstand zwischen sich zu maximieren, wodurch sie beginnen, sich zu bewegen.

Als die Physiker die Entwicklung der Geschwindigkeitsverteilung für verschiedene Teilchendichten bestimmten, erkannten sie, dass sich der Zustand irgendwann zeitlich nicht mehr änderte – und das, obwohl das System noch nicht im Gleichgewicht war.

Im Experiment mussten die Forscher diesen Zustand für jede einzelne Geschwindigkeit rekonstruieren, da sich die schnelleren Teilchen bereits durch Stöße erwärmten, während die langsameren Atome den unveränderlichen Zustand noch nicht erreicht hatten. Die Kollegen aus Cambridge konnten zeigen, dass sowohl die Entwicklung des Systems als auch sein Zustand universell sind und nicht von der Teilchendichte des Gases abhängen.

Mit diesen drei Forschungsergebnissen, die allesamt bei »Nature« erschienen sind, mehren sich nun auch die experimentellen Hinweise darauf, dass Quantensysteme fernab des Gleichgewichts universellen Regeln folgen. Auf theoretischer Seite weisen Arbeiten von Jürgen Berges und Thomas Gasenzer, beide an der Universität Heidelberg, in die gleiche Richtung. Suprafluide, die verschiedene Formen der Quantenturbulenz aufweisen können, sollen demnach ebenfalls universellen Gesetzmäßigkeiten unterliegen, ebenso wie das Universum 10^{-33} bis 10^{-30} Sekunden nach dem Urknall. Gleiches erwartet man für das Quark-Gluon-Plasma, welches das Universum wenige zehntel Millisekunden nach dem Urknall ausfüllte und inzwischen auch in Schwerionenkollisionen etwa am Large Hadron Collider am CERN erzeugt wird.

Weitere Beispiele für eine solche Universalität fern des Gleichgewichts könnten sich in Dunkler Materie, im Inneren von Neutronensternen oder in der Dynamik magnetischer Materialien finden. Meine Kollegen und ich untersuchen derzeit an der Universität Heidelberg, der TU Wien und der University of Nottingham die Eigenschaften von Materie in solch extremen Zuständen.

Wenn unsere Vermutung stimmt, könnte man auch außerhalb des Gleichgewichts unterschiedlichste Systeme klassifizieren. Welche Universalitätsklassen es gibt und wie man sie bestimmt, ist allerdings noch unklar. Ich hoffe, dass unsere Arbeiten uns den Antworten auf viele damit verbundene Fragen ein wenig näher gebracht haben. Und vielleicht ermöglichen sie sogar einen neuen Blick auf die alten Probleme der klassischen Turbulenz. ◂

QUELLEN

Eigen, C. et al.: Universal prethermal dynamics of Bose gases quenched to unitarity. Nature 563, 2018

Erne, S. et al.: Universal dynamics in an isolated one-dimensional Bose gas far from equilibrium. Nature 563, 2018

Prüfer, M. et al.: Observation of universal dynamics in a spinor Bose gas far from equilibrium. Nature 563, 2018

UMWELT

DER GRÖSSTE ALGENTEPPICH DER ERDE

Abholzung in Amazonien und Meeresströmungen begünstigen eine gigantische Blüte von *Sargassum*-Braunalgen im Atlantik.

Barbados ist ein kleiner, ruhiger Inselstaat vor der Küste Südamerikas – und wegen seiner Strände als karibisches Traumziel bekannt. Doch 2018 rief die Regierung wegen eines außergewöhnlichen Naturereignisses den nationalen Notstand aus. An den Küsten türmten sich Berge von Braunalgen der Gattung *Sargassum*, die in der Sonne rasch verrotteten und dadurch die Luft mit Schwefelwasserstoff verpesteten. Zudem behinderten sie den Zugang zum Meer, wo weitere Algenteppiche trieben. Auch benachbarte Inseln sowie die karibischen Regionen Mexikos und einige Gebiete an der Nordküste Südamerikas meldeten bis dahin nicht gekannte Mengen angeschwemmter Braunalgen.

Lange waren große *Sargassum*-Felder vor allem aus der Sargassosee bekannt, die ihren Namen jenen Braunalgen verdankt. Diese Region im Atlantik zwischen der US-Ostküste und den Bermuda-Inseln wird von vier großen Meeresströmungen begrenzt – Golf-, Nordatlantik-, Kanaren- und Nordäquatorialstrom –, welche die Algenteppiche in der Sargassosee halten. Im Golf von Mexiko existieren ebenfalls kleinere, frei schwimmende *Sargassum*-Felder. Verantwortlich sind dafür die beiden Arten *S. natans* und *S. fluitans*, die nicht im Boden verankert sind, sondern dank der Schwimmblasen in ihrem Gewebe im freien Wasser schwimmen. Alle anderen bekannten Spezies sind dagegen standorttreu und bilden teilweise küstennahe Tangwälder.

Massenhafte Ansammlungen der frei treibenden Vertreter versetzten in früheren Jahrhunderten Seefahrer in Angst und Schrecken: In windarmen Regionen behinderten sie das Fortkommen der Segelschiffe, und die Matrosen fürchteten, darin stecken zu bleiben. Außerdem kannten die Seeleute damals nur Braunalgen, die in Küstennähe wuchsen. Sie nahmen deshalb an, dass sie sich in flachen Gewässern befanden und auf Grund laufen könnten. Aber außerhalb der Sargassosee bereiteten die Algen nach bisherigem Wissen keine Probleme – bis 2010. Seitdem vollzieht sich ein dramatischer Wandel, wie ein Team um die Meereswissenschaftlerin Mengqiu Wang von der University of South Florida in Tampa zeigte. Die Forscher analysierten Satellitenbilder, verschiedene ozeanografische Daten seit dem Jahr 2000 sowie historische Aufzeichnungen. Moderne Satelliten können größere *Sargassum*-Felder gut über die starke Infrarotrückstrahlung des in den Pflanzen vorhandenen Chlorophylls nachweisen und damit gegenüber dem Meerwasser, Wolken oder Dunst abgrenzen.

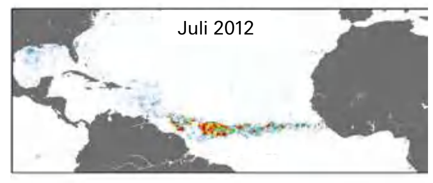
Diese Aufnahmen illustrieren einen eindeutigen Trend. Von der Jahrtausendwende bis 2010 traten keine ausgedehnten Braunalgenblüten im zentralen Atlantik und der Karibik auf. Danach kam es hingegen in jedem Jahr bis auf 2013 zu großen Teppichen, wobei das Ausmaß jährlich schwankte. Den vorläufigen Höhepunkt erreichten sie 2018, als sich ein Braunalgenband über 8850 Kilometer im Atlantik erstreckte. Der Gürtel aus treibendem *Sargassum* dehnte sich von der Küste Westafrikas bis nach Brasilien und in die Karibik aus. Die darin vorhandene Biomasse wog schätzungsweise 20 Millionen Tonnen, wobei das noch die Untergrenze sein dürfte: Kleinere Ansammlungen, die weniger als 300 Meter Durchmesser aufweisen, können die Satelliten nicht erfassen. Die dichtesten Konzentrationen bildete der Teppich vor der nördli-

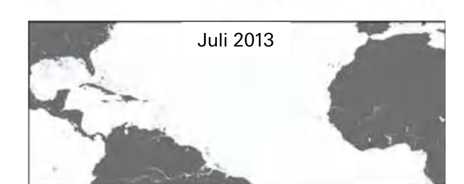
Bis auf 2013 treten seit 2011 im Sommer große *Sargassum*-Teppiche im Atlantik zwischen der Westküste Afrikas und Lateinamerika auf.

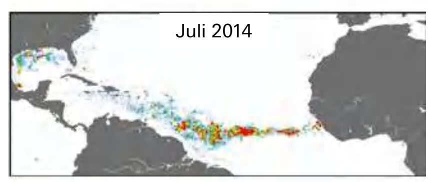
Juli 2011

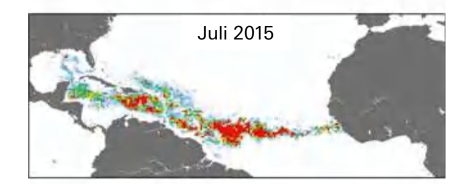
1000 km

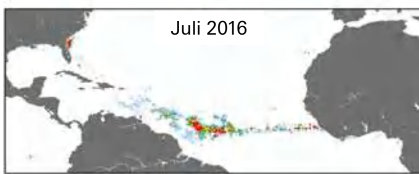
> 0,1 % 0,0 %

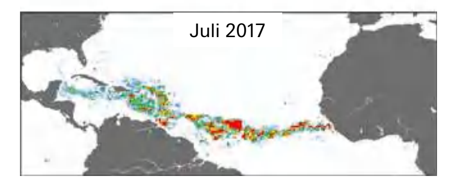


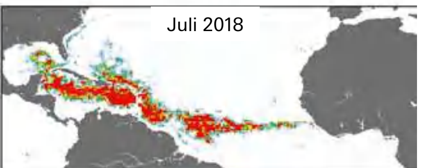












UNIVERSITY OF SOUTH FLORIDA COLLEGE OF MARINE SCIENCE


2018 erstreckte sich ein riesiger Gürtel aus Braunalgen über 8000 Kilometer im Atlantischen Ozean.

BRIAN LAPOINTE, FLORIDA ATLANTIC UNIVERSITY'S HARBOR BRANCH OCEANOGRAPHIC INSTITUTE (HBOI)

chen Küste Südamerikas und in der Karibik, wo er Inselstaaten wie Barbados beeinträchtigte. Auch in den historischen Daten fanden die Wissenschaftler keine Aufzeichnungen über vergleichbare Braunalgenblüten.

Bei der Auswertung verschiedener Messwerte stießen Wang und Co auf einen potenziellen Wendepunkt, der den ersten großen Algenblüten vorausging. Ab 2009 gelangten über den Amazonas offensichtlich sehr hohe Nährstoffmengen aus landwirtschaftlicher Nutzung in den Atlantik. Sie schufen vor der Mündung die Grundlage für die spätere Massenvermehrung von *Sargassum*. Ein zweites – natürliches – Ereignis vor der westafrikanischen Küste löste schließlich die erste Blüte aus: Im Winter 2010 stieg verstärkt kaltes, nährstoffreiches Wasser dank vom Land wehender Winde auf. Beides fördert das Wachstum von Braunalgen. Dadurch entstanden größere Bestände, die Winde und Meeresströmungen anschließend in Richtung Südamerika trieben.

Dort trafen sie dann auf die vom Amazonas eingetragenen Nährstoffe, was schließlich den Bestand explodieren ließ. Ähnliche Bedingungen sorgten 2014, 2015, 2017 und vor allem 2018 für die Massenvermehrungen. 2013 fiel die Blüte hingegen aus, weil sich im Winter davor kaum Teppiche vor Westafrika gebildet hatten und damit die Initialzündung ausblieb. 2009 und 2010 waren die Bedingungen für die Braunalgen vor Südamerika ebenfalls ungünstig: Starke Niederschläge und entsprechender Zustrom aus dem Amazonas hatten den Salzgehalt des Atlantiks vor der Küste stark reduziert, und im darauf folgenden Jahr hatte sich der Ozean hier überdurchschnittlich erwärmt. Beides hemmt das Algenwachstum.

Landwirtschaft als Ursache

Warum begannen die Blüten aber erst 2011, obwohl die Abholzung und landwirtschaftliche Nutzung Amazoniens seit Jahrzehnten voranschreitet? Auch hier wurde womöglich um 2010 ein Kipppunkt erreicht, vermuten die Forscher. Die Entwaldung ist seit dem letzten Höhepunkt 2004, als über 25000 Quadratkilometer abgeholzt wurden, zwar deutlich zurückgegangen (sie steigt seit Amtsantritt des brasilianischen Präsidenten Jair Bolsonaro allerdings erneut stark an). Doch gilt mittlerweile ein Fünftel des ehemaligen Regenwaldgebiets als gerodet und landwirtschaftliche Fläche – meist Viehweiden oder Sojaplantagen. Betroffen ist davon vor allem das östliche Amazonasbecken, das näher am Atlantik liegt. Auf dem neuen Nutzland werden laut den Daten seit 2010 verstärkt Düngemittel eingesetzt; zwischen 2011 und 2018 steigerte sich die ausgebrachte Menge um 67 Prozent. Ein Teil der stickstoffhaltigen Nährstoffe wird von den Niederschlägen in den Amazonas und darüber in den Atlantik gespült. »Ab diesem Zeitpunkt um 2010/11 muss sich die Chemie des Ozeans so geändert haben, dass die Blüten völlig außer Kontrolle gerieten«, sagt der an der Studie beteiligte Forscher Chuanmin Hu.

Dadurch verändert sich die ökologische Funktion der *Sargassum*-Bestände: Auf offenem Meer bieten sie wichtige Lebensräume und Rückzugsräume für junge Meeresschildkröten, Fische und andere Organismen. In der Sargassosee spielen sie zudem eine starke Rolle als Kinderstube der europäischen Aale, die in der Region laichen, bevor die Jungtiere wieder zurück nach Europa wandern, um dort ihre ursprünglichen Flussökosysteme zu besiedeln.

Diese positive Wirkung geht jedoch verloren, wenn die bis zu sieben Meter dicken Teppiche in Küstengewässer gelangen und sich dort über Seegraswiesen und Korallenriffe legen. Sie schränken einerseits die Beweglichkeit kleinerer Organismen ein und unterbinden den direkten Zugang der Korallen und Seegräser zu Licht, Nährstoffen und frischem Wasser. Der Abbau abgestorbener Algen verringert auch den Sauerstoffgehalt des Meeres und verursacht im Extremfall lokale Todeszonen, in denen vorhandene Ökosysteme absterben. Einige Studien haben ergeben, dass *Sargassum*-Matten die An- und Wiederbesiedlung von Riffen durch Korallenpolypen hemmen oder völlig unterbinden. Geschädigte Korallenbänke – etwa durch Bleichereignisse – erho-

len sich also langsamer oder gar nicht mehr. Ein Risiko bilden die Algen schließlich auch für den Nachwuchs bedrohter Meeresschildkrötenarten: Während die Jungen normalerweise nach dem Schlüpfen zügig über die von ihren Müttern aufgesuchten Sandstrände ins Wasser wandern, stellen die *Sargassum*-Matten teilweise unüberwindliche Hindernisse dar, an denen die Tiere verenden. Selbst wenn sie es in das Wasser schaffen, können große, dicke Teppiche verhindern, dass die Schildkröten zum Atmen auftauchen. Konkrete Zahlen liegen diesbezüglich noch nicht vor, doch einzelne Beobachtungen legen hohe Todeszahlen nahe.

Ob der *Sargassum*-Gürtel zum Normalzustand im tropischen Atlantik wird, können die Forscher noch nicht sagen. Die ersten Satellitendaten für 2019 deuten auf ein weiteres Rekordjahr hin. Verschiedene Faktoren, die das Wachstum begünstigen, dürften sich in den nächsten Jahren nicht verändern: Abholzung und Düngereinsatz in Brasilien nehmen zu, so dass konstanter Nährstoffeintrag über den Amazonas gewährleistet ist. Andere Parameter sind dagegen schwieriger vorherzusagen. Offene Fragen sind etwa, ob und in welchem Umfang der Eintrag von Nährelementen aus der Sahara in den Ozean das Algenwachstum fördert. Auch der Klimawandel spielt eine Rolle, da *Sargassum* in kälterem Wasser besser wächst, während höhere Temperaturen die Verbreitung hemmen – was angesichts der Prognosen eher gegen eine dauerhafte Ausweitung der Algenblüten spricht. Andererseits könnten sich ablandige Winde vor der westafrikanischen Küste verstärken und so den Aufstieg kalten Tiefenwassers begünstigen. Davon würde *Sargassum* wiederum profitieren. Eines Tages könnten sich die Algenteppiche vielleicht sogar noch in andere Ozeane ausbreiten. ◂

Daniel Lingenhöhl ist promovierter Geowissenschaftler und Redaktionsleiter von »Spektrum.de«.

QUELLE

Wang, M. et al.: The great Atlantic Sargassum belt. Science 365, 2019

ONKOLOGIE

KREBSZELLEN STERBEN DEN »EISENTOD«

Viele Tumoren sind anfällig gegenüber der Ferroptose – einer Variante des Zelltods, an dem Eisen beteiligt ist. Bietet sich hier ein neuer Ansatz für Krebstherapien?

▸ Genau wie Menschen können auch einzelne Körperzellen auf unterschiedliche Weise sterben. Den plötzlichen Unfalltod einer Person könnte man auf der Zellebene mit der Nekrose vergleichen, bei der Zellen infolge schwerer Schäden (beispielsweise an ihrer Plasmamembran) regelrecht zerplatzen und ihren Inhalt in die Umgebung freisetzen. Dagegen entspricht die Apoptose – der »programmierte Zelltod« – eher einem minuziös geplanten Suizid: Die Zellkomponenten werden in vorgegebener Reihenfolge abgebaut, in kleine membranumhüllte Bläschen verpackt und vom Immunsystem entsorgt.

Zwischen den Extremen der chaotischen Nekrose und der sorgfältig abgestimmten Apoptose liegen etliche weitere Varianten des Untergangs, wie Forscher in den zurückliegenden Jahren herausgefunden haben. Es sind Todesarten mit altgriechischen Namen wie Necroptose, Netose oder Entose. Das neueste Mitglied dieser Liste heißt Ferroptose.

Als der Chemiker Brent Stockwell 2003 in seinem Labor am Whitehead Institute for Biomedical Research in Cambridge (Massachusetts) nach Substanzen suchte, die Tumorzellen spezifisch angreifen, ahnte er zunächst nicht, dass er dabei auf eine ganz neue Art von Zelltod stoßen würde. Er hatte sich auf kleine Moleküle konzentriert, die eine Fehlbildung des RAS-Proteins erkennen – eines bei Krebserkrankungen häufig veränderten Eiweißes. Stockwell stieß auf eine Substanz, die er Erastin nannte und die einen schnellen Zerfall der Krebszellen herbeiführte. Allerdings geschah dies auf eigenartige Weise: Anders als bei der Nekrose oder der Apoptose schrumpften manche Zellkomponenten, während sich die Membranen zu verdichten und zu zersetzen schienen. Vor allem aber hing der Prozess von der Anwesenheit von Eisenionen ab und ging mit einer starken Zunahme von reaktionsfreudigen Lipidperoxiden einher. Fing Stockwell das freie Eisen mit speziellen Molekülen ab, verhinderte dies die Anhäufung von Lipidperoxiden und zugleich den Zelltod. Ähnliche Beobachtungen machte ein Team um Marcus Conrad vom Helmholtz Zentrum München, das mit veränderten Hirnzellen von Mäusen arbeitete.

Zusammenbruch der Zellmembran

2012 gab Stockwell der neuen Variante des zellulären Zerfalls den Namen Ferroptose. Die Bezeichnung leitet sich vom lateinischen »ferrum« (Eisen) und dem altgriechischen »ptosis« (Fall) ab. Zur Ferroptose kommt es, wenn Eisen für die Oxidation mehrfach ungesättigter Fettsäuren in den Zellmembranen sorgt – entweder direkt oder indirekt über eisenabhängige Enzyme. Dabei entstehen Lipidperoxide, die sich in den Membranen anhäufen und diese schädigen. Auch die reaktionsfreudigen Zwischenprodukte ihrer Entstehung greifen die Membranbestandteile an, was zur Bildung weiterer Lipidperoxide führt. Werden diese nicht hinreichend abgefangen, bricht die Membranstruktur zusammen und die Zelle stirbt.

Insbesondere Zellen im zentralen Nervensystem, aber auch in der Niere oder der Leber haben sich als anfällig für die Ferroptose erwiesen. Tierexperimente lassen vermuten, dass der Eisentod hinter den massiven Schäden steckt, die einem Schlaganfall oder einer Hirnblutung folgen können, und dass er an neurodegenerativen Erkrankungen wie Alzheimer, Parkinson oder Huntington mitwirkt. Auch bei so

genannten Reperfusionsschäden, etwa Beeinträchtigungen eines transplantierten Organs infolge plötzlicher Sauerstoffzufuhr, könnte die Ferroptose maßgeblich beteiligt sein.

Wie Zellen sich normalerweise vor Ferroptose schützen, darauf lieferten Stockwells Arbeiten ebenfalls Hinweise. Seine Kollegen und er versuchten herauszufinden, wie das von ihnen entdeckte kleine Molekül Erastin den Eisentod in Gang setzt. Sie wussten bereits, dass Glutaminsäure in Hirnzellen von Mäusen einen ferroptoseähnlichen Zelltod auslösen kann, indem sie das Transportprotein »System Xc-« lahmlegt. Dieser Transporter befördert Cystin (den Vorläufer der Aminosäure Cystein) durch die Membran und gleichzeitig in entgegengesetzter Richtung Glutaminsäure – er ist also ein »Antiporter«, der über die Zellmembran hinweg eine Molekülsorte gegen eine andere tauscht. Indem Stockwell und sein Team Cystinmoleküle radioaktiv markierten, konnten sie zeigen, dass Erastin an System Xc- koppelt und den Transporter hemmt. Seither haben mehrere Studien belegt, dass der Mechanismus, der von System Xc- ausgeht, der Ferroptose entgegenwirkt. Ist er blockiert, steht der Ferroptose nichts mehr im Weg und die Zelle stirbt den Eisentod.

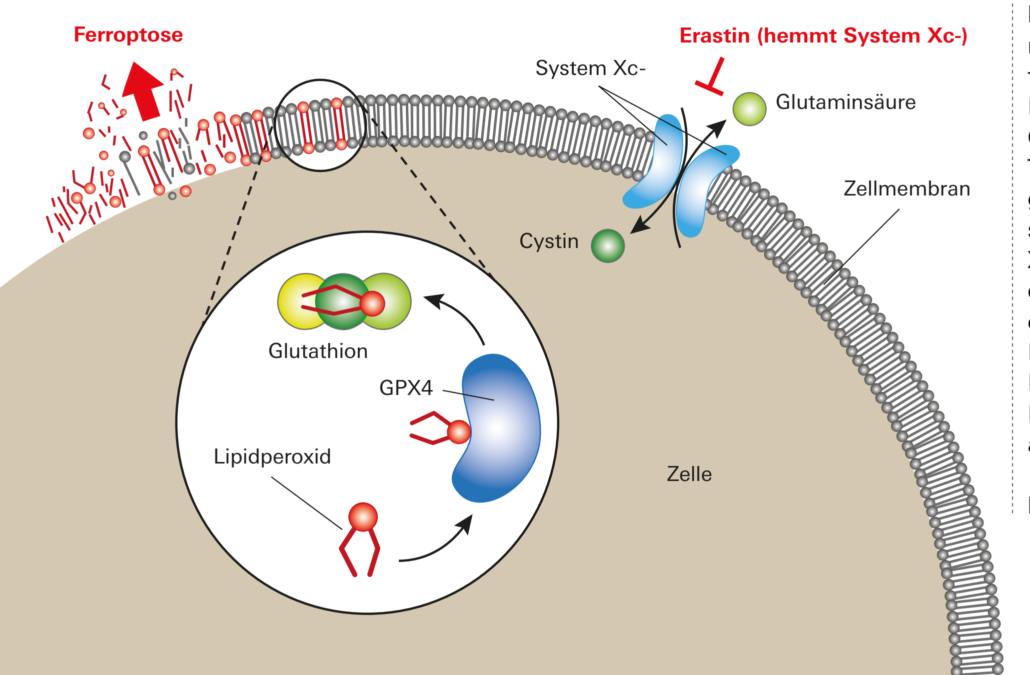
System Xc- ist für die Ferroptose bedeutsam, weil die Zelle die von ihm eingeschleusten Cystinmoleküle für die Herstellung von Glutathion (GSH) verwendet – dem häufigsten und wichtigsten Antioxidans im menschlichen Körper, das reaktionsfreudige Sauerstoffspezies abfängt. 2014 entdeckten Stockwells Gruppe sowie das Team um Marcus Conrad ein Molekül, das mit Glutathion interagiert und die Ferroptose bremst. Schalteten die Wissenschaftler dieses Eiweiß namens GPX4 in Mäusen aus, starben die Tiere an akutem Nierenversagen durch Ferroptose. GPX4 ist, wie die Forscher heute wissen, der zentrale Regulator des Eisentods. Es verhindert den Untergang der Zelle, indem es Lipidperoxide gezielt an Glutathion weitergibt, das sie unschädlich macht.

In vielen Tumorzellen lässt sich die Ferroptose relativ leicht auslösen, das wissen die Forscher schon länger. Die Gründe dafür sind noch nicht ganz klar. Entartete Zellen weisen infolge ihres gesteigerten Stoffwechsels häufig einen erhöhten Eisenspiegel auf, was sie generell empfindlicher gegenüber dem Eisentod machen sollte. Manche gleichen dies aber aus, indem sie System Xc- übermäßig stark aktivieren. Ein solches Hochfahren der Transporteraktivität wurde beispielsweise bei bestimmten Brustkrebsarten beobachtet, die als »dreifach negativ« bezeichnet werden und besonders schwer zu behandeln sind. Die Stärke der Krebszellen könnte jedoch zugleich ihre Schwäche sein: Ihre Abhängigkeit von System Xc- bietet ein mögliches Angriffsziel für neue Tumortherapien. Forscher suchen derzeit mit Hochdruck nach Substanzen, die den Transporter lahmlegen, um mit deren Hilfe die Ferroptose in Krebszellen zu erzwingen. Ähnliches könnten GPX4-Hemmstoffe leisten. Seit Kurzem ist bekannt, dass manche Tumorsuppressor-Proteine wie p53 unter anderem dadurch vor Krebserkrankungen schützen, indem sie System Xc- unterdrücken.

Erzwungener »Eisentod«

Wissenschaftler um Weiping Zou von der University of Michigan haben jetzt in Tierversuchen gezeigt: Krebsimmuntherapien, die das Immunsystem auf den Tumor »hetzen« sollen, hängen zum Teil ebenfalls von der Ferroptose ab. Zumindest bei manchen Krebsarten wirken Immuncheckpoint-Inhibitoren (Substanzen, die eine starke Abwehrreaktion des Körpers gegen die Tumorzellen entfesseln sollen) erheblich schlechter, wenn die Ferroptose verhindert wird. Immuncheckpoint-Inhibitoren veranlassen unter anderem die Ausschüttung des Proteins IFN-gamma, das an Entzündungsprozessen mitwirkt, Immunreaktionen stimuliert und Anti-Tumor-Eigenschaften hat. Dieses Protein unterdrückt System Xc- und befördert somit die Ferroptose. Der therapeutische Effekt der Checkpoint-Inhibitoren lässt sich somit wahrscheinlich verstärken, wenn man zusätzlich noch Wirkstoffe verabreicht, die System Xc- hemmen. Bei krebskranken Mäusen etwa drosselte die alleinige Gabe von Checkpoint-Inhibitoren das Tumorwachstum um 40 Prozent – verglichen mit 75 Prozent, wenn die Forscher darüber hinaus noch System Xc- blockierten. In die gleiche Richtung deuten Untersuchungen an menschlichen Krebspatienten, laut denen die Behandlung mit Immuncheckpoint-Inhibitoren umso weniger wirkt und die Krankheitsprognose umso schlechter ausfällt, je aktiver System Xc- ist.

Ferroptose zu erzwingen, könnte die heutigen Krebsimmuntherapien also



Bei der Ferroptose, dem »Eisentod« der Zelle, zersetzt sich die Zellmembran. Ihr entgegen wirken das Transportprotein »System Xc-«, das Protein GPX4 sowie das Antioxidans Glutathion.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: EMMANUELLE VANIET

wirksam ergänzen. Vor allem solche Patienten könnten davon profitieren, bei denen die Therapie allein nur unzureichend wirkt. Denn Untersuchungen an Hautkrebszellen zeigen: Je aggressiver die Tumoren, desto empfindlicher sind sie gegenüber dem Eisentod. Forscher um Jennifer Tsoi von der University of California in Los Angeles haben Zellen des malignen Melanoms (»schwarzer Hautkrebs«) von verschiedenen Patienten untersucht und konnten sie in vier Gruppen einteilen. In der ersten Gruppe ähnelten die Krebszellen noch relativ stark gesunden Hautzellen, zeigten sich weitgehend ausdifferenziert und sprachen auf gängige Therapien gut an. Von Gruppe 2 bis 4 waren die Zellen dann immer stärker entartet, immer weniger ausdifferenziert und immer stammzellähnlicher, was sie in wachsendem Maß wandlungsfähig und therapieresistent machte. Zugleich aber stieg ihre Anfälligkeit gegenüber der Ferroptose.

Lässt sich mit Ferroptose die Resistenz von Krebszellen durchbrechen? Nur unter bestimmten Bedingungen, betont Markus Conrad vom Helmholtz Zentrum. So zeigten manche Studien: GPX4, das als neues Zielmolekül für Krebstherapien intensiv erforscht wird, hält gleichzeitig Entzündungsfaktoren in Schach, die ihrerseits das Tumorwachstum fördern und die Immunreaktion dämpfen können. Eine Hemmung von GPX4 könnte also den Effekt einer Krebsimmuntherapie durchkreuzen. »Die Ferroptose kann sich unter Umständen als doppelschneidiges Schwert erweisen«, warnt Conrad. Es sind also weitere Untersuchungen nötig, um sämtliche Facetten des Eisentods aufzudecken, bevor er einen Platz in der klinischen Anwendung findet. ◂

Emmanuelle Vaniet ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.

QUELLEN

Dixon, S.J. et al.: Ferroptosis: An Iron-dependent form of nonapoptotic cell death. Cell 149, 2012

Friedmann, A. et. al.: Ferroptosis at the crossroads of cancer-acquired drug resistance and immune evasion. Nature Reviews Cancer 19, 2019

Tsoi, J. et al.: Multi-stage differentiation defines melanoma subtypes with differential vulnerability to drug-induced Iron-dependent oxidative stress. Cancer Cell 33, 2018

Wang, W. et al.: CD8+ T cells regulate tumor ferroptosis during cancer immunotherapy. Nature 569, 2019

KOSMOLOGIE
HUBBLE-DEBATTE WIRD NOCH RÄTSELHAFTER

Astrophysiker sind sich uneins, wie schnell das Weltall expandiert. Nun sorgt eine neue Messung für Überraschung – womöglich mit unabsehbaren Folgen für unser Weltbild.

Seit Jahren streiten Kosmologen über die Expansionsgeschwindigkeit des Weltalls: Die beiden präzisesten Messmethoden kommen zu unterschiedlichen, scheinbar inkompatiblen Ergebnissen. Nun liegt ein neues, unabhängiges Resultat vor, das Experten mit Spannung erwartet haben. Doch statt das Rätsel zu lösen, vergrößert die Messung des Teams um Wendy Freedman von der University of Chicago die Verwirrung: Die damit ermittelte Ausdehnungsrate fällt fast genau zwischen die bisher bekannten Werte. »Im Moment versuchen wir noch zu verstehen, wie das alles zusammenpasst«, sagt Freedman.

Für die Kosmologie steht viel auf dem Spiel: Wenn die Messungen weiter auseinanderklaffen sollten, könnte das auf Fehler in der grundlegenden Theorie hinauslaufen, mit der Forscher das Universum modellieren. »Es geht hier um nicht weniger als die Grundfesten der Physik«, findet Freedman.

Schon in den 1920er Jahren entdeckten Wissenschaftler, dass sich das All ausdehnt. Neben dem US-Amerikaner Edwin Hubble spielte hierbei auch der Belgier Georges Lemaître eine wichtige, lange verkannte Rolle. Hubble, Lemaître und andere konnten damals nachweisen, dass sich die meisten Galaxien von der Milchstraße wegbewegen. Die Messdaten zeigten eindeutig: Je weiter eine Galaxie entfernt ist, desto schneller bewegt sie sich von uns weg. Das Verhältnis zwischen Fluchtgeschwindigkeit und Distanz in unserer kosmologischen Nachbarschaft erhielt damals die Bezeichnung »Hubble-Konstante«.

Sie ist bis heute das Maß, mit dem Astrophysiker die Expansionsrate des uns umgebenden Weltalls angeben. Edwin Hubble kam in den 1920er Jahren auf einen Wert von 500 Kilometer pro Sekunde (km/s) und Megaparsec (3,26 Millionen Lichtjahre). Anschaulich bedeutete dies, dass mit jedem Megaparsec Entfernung die Fluchtgeschwindigkeit um 500 km/s zulegte. Im Lauf der Jahrzehnte korrigierten Astronomen die Schätzung deutlich nach unten. Auf einen exakten Wert konnten sie sich jedoch nicht einigen.

Wendy Freedman leistete in den 1990er Jahren einen wichtigen Beitrag zu dieser Debatte rund um die Hubble-Konstante. Auf Basis von Beobachtungen des Hubble-Weltraumteleskops errechnete sie einen Wert von 72, wobei die Messungenauigkeit zehn Prozent betrug.

Ein Team um Adam Riess von der Johns Hopkins University in Baltimore, Maryland, knüpfte bald darauf an diese Arbeiten an. Der US-Amerikaner erhielt 2011 den Nobelpreis für Physik, denn er konnte Ende der 1990er Jahre nachweisen, dass sich die Expansion des Alls immer stärker beschleunigt. Astrophysiker führen dies auf das

Wirken der rätselhaften Dunklen Energie zurück.

In den vergangenen Jahren haben Riess und sein Team die Präzision ihrer Expansionsmessungen immer weiter verbessert. Erst vor wenigen Monaten präsentierten die Forscher ihre jüngste Schätzung, die ebenfalls auf Daten des Hubble-Teleskops aufbaut: Demnach liegt die Hubble-Konstante eher bei 74, wobei die Messungenauigkeit nur noch 1,9 Prozent betragen soll.

Damit liegen Riess und Co jedoch deutlich über dem Ergebnis eines anderen gut etablierten Messverfahrens: Wissenschaftler des ESA-Satelliten Planck haben das Nachglimmen des Urknalls kartiert, den so genannten kosmischen Mikrowellenhintergrund. Aus der extrem schwachen, über den ganzen Himmel verteilten Strahlung lassen sich grundlegende Eigenschaften des Universums ableiten, darunter auch die Hubble-Konstante. Das Planck-Team kommt auf dieser Basis auf einen Wert von 67,4, mit einer Ungenauigkeit von gerade einmal 0,5 Prozent.

Der Unterschied zwischen 67,4 und 74 mag klein erscheinen, aber er ist mittlerweile statistisch signifikant, da beide Techniken im Lauf der Zeit immer genauer geworden sind. Theoretiker fragen sich daher zunehmend, ob der Grund für die Diskrepanz nicht etwa auf einen Mess- oder Auswertungsfehler zurückgeht, sondern in der Standardtheorie der Kosmologie begraben liegt, dem so genannten ΛCDM-Modell. Es postuliert, dass neben sichtbarer Materie auch Dunkle Materie im Urknall entstanden ist, die sich nur über ihre Schwerkraft bemerkbar macht. Daneben sieht das kosmologische Standardmodell die Dunkle Energie vor, die ein fester Bestandteil des Vakuums sein könnte und dort als eine Art Anti-Schwerkraft wirkt.

Theoretiker haben immer wieder versucht, das akzeptierte Weltmodell schlüssig umzuformulieren und so eine Erklärung für die konkurrierenden Messwerte der Hubble-Konstante zu finden, die kompatibel mit sonstigen Beobachtungsdaten ist. Bisher vergeblich. Dennoch stehen nach wie vor neue Naturgesetze als Erklärung im Raum: Vielleicht muss das Standardmodell der Kosmologie um einige Zutaten erweitert werden, oder die bekannten Bestandteile haben andere Eigenschaften als gedacht. So ließe sich erklären, dass das Planck-Teleskop, das aus dem jungen Universum ins Heute extrapoliert, einen anderen Hubble-Wert ermittelt als Messungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop in unserer kosmologischen Nachbarschaft.

Rote Riesensterne helfen Forschern dabei, die kosmische Expansion zu vermessen.

NASA AND ESA (WWW.SPACETELESCOPE.ORG/IMAGES/POTW1751A/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

Knifflige Entfernungsmessung

Doch erst müssen die Forscher ausschließen, dass die abweichenden Ergebnisse auf Messfehler zurückgehen. Klärung sollen unabhängige Methoden bringen, von denen es mittlerweile eine ganze Reihe gibt. Sie weisen jedoch eine beträchtliche Bandbreite von Ergebnissen auf, die mal Riess bestätigen, wie beispielsweise eine aktuelle Messung von Forschern des H0LiCOW-Projekts vom Garchinger Max-Planck-Institut für Astrophysik. Andere unabhängige Analysen stehen hingegen eher im Einklang mit dem Planck-Team (siehe **Spektrum** Juli 2018, S. 12).

Wendy Freedmans Methode sollte der festgefahrenen Debatte eine Richtung weisen. Sie setzt an einer Schwachstelle der Messung auf Basis des Hubble-Weltraumteleskops an und liefert eine weitgehend unabhängige Herangehensweise. Allerdings bestätigt Freedmans Ergebnis weder Riess noch Planck – sondern landet bei einer Hubble-Konstante von 69,8, zwischen den konkurrierenden Werten.

Die Analyse nutzt eine alternative Methode, um die Entfernung zu anderen Galaxien zu ermitteln – seit eh und je der schwierigste Teil bei der Messung der Hubble-Konstante. Edwin Hubble nutzte dazu vor 90 Jahren Sterne, deren Helligkeit periodisch schwankt, die so genannten Cepheiden. Die Astronomin Henrietta Swan Leavitt hatte schon Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckt, dass man deren tatsächliche Helligkeit aus ihrer Pulsationsdauer ableiten konnte. Indem Leavitt maß, wie hell die Sterne auf fotografischen Platten erschienen, konnte sie berechnen, wie weit die Sterne entfernt waren.

Astronomen nennen solche Wegweiser Standardkerzen. Sie spielen nach wie vor eine wichtige Rolle bei dem Verfahren von Adam Riess und seinen Kollegen. Aber andere Forscher sind sich bis heute unsicher, ob man die Cepheiden und ihr Umfeld richtig

versteht beziehungsweise ob diese eine wirklich präzise Entfernungsmessung erlauben. So driften die hellen Riesensterne oft in mit kosmischem Staub gefüllten Sternhaufen durchs All, was die Abschätzung ihrer Helligkeit verzerren könnte.

Astrophysiker haben deshalb immer wieder versucht, bessere Standardkerzen als Cepheiden zu finden. »Um der Sache auf den Grund zu gehen, brauchen wir unabhängige Methoden, welche die Cepheiden kontrollieren können«, sagt Freedman. Sie hat einen Großteil ihrer Karriere damit verbracht, die Präzision und Genauigkeit der Cepheiden-Methode zu verbessern. Für ihre neue Messung der Hubble-Konstante hat die renommierte Astrophysikerin die veränderlichen Sterne nun jedoch hinter sich gelassen. Stattdessen haben sie und ihr Team Rote Riesen verwendet, die in der Studie zusammen mit Supernova-Explosionen als Meterstock für weiter entfernte Galaxien dienten.

Die alten, aufgeblähten Sterne kommen häufiger vor als Cepheiden. Es gibt sie oft auch an den Rändern weit entfernter Galaxien, wo sie besser zu erkennen sind und wo Staub, der die Messungen verfälscht, ein weniger großes Problem sein sollte. Rote Riesen sind an und für sich sehr unterschiedlich. Aber eine Eigenschaft macht ihre Population dennoch zu einer nützlichen Standardkerze: Sie werden im Lauf von Millionen Jahren immer heller, bis sie ein Maximum erreichen. Anschließend werden sie auf einen Schlag sehr viel dunkler.

Wenn Astronomen eine große Gruppe von Sternen nach Farbe und Helligkeit sortieren, bilden die Roten Riesen daher eine Wolke von Punkten, die an einer scharfen Kante endet. Die Sterne an diesem Rand können dann als Standardkerzen dienen. Freedmans Team benutzte die Technik, um die Entfernungen zu 18 Galaxien zu berechnen, und erhielt eine Schätzung der Hubble-Konstante, deren Genauigkeit zum ersten Mal mit der der cepheidenbasierten Studien vergleichbar ist.

Adam Riess hat bereits Zweifel angemeldet. Er argumentiert, die Studie seiner Kollegin beruhe nach wie vor auf Annahmen über die Staubmenge in Galaxien – insbesondere in der Großen Magellanschen Wolke, die Freedman als Ankerpunkt verwendete. »Der Einfluss von Staub ist sehr schwierig abzuschätzen, und ich bin sicher, dass es viele Diskussionen geben wird«, sagt Riess.

In der Tat lässt das Ergebnis von Freedman Spielraum für Interpretationen. Streng genommen ist es sowohl mit der Planck-Vorhersage als auch mit der Cepheiden-Berechnung kompatibel – die Fehlerbalken der Methoden überschneiden sich jeweils. Die Genauigkeit der Technik wird sich wohl aber noch verbessern, wenn die Astrophysiker weitere Daten über Rote Riesen sammeln. Die Methode könnte damit in Zukunft sogar genauer werden als die Cepheiden-Herangehensweise. Ob sich der so ermittelte Wert der Hubble-Konstante dann in eine Richtung bewegt, ist unklar. Er könnte genauso gut gleich bleiben und zu dem Punkt werden, auf den sowohl das Planck-Team als auch Riess' Gruppe zusteuern. Fest steht nur: Kosmologen steht weiterhin Arbeit bevor. ◂

Davide Castelvecchi arbeitet als Wissenschaftsreporter für »Nature« in London.

QUELLEN

Freedman, W. et al.: The Carnegie-Chicago Hubble program. VIII. An independent determination of the Hubble constant based on the tip of the red giant branch. ArXiv, 1907.05922, 2019

Riess, A. et al.: Large Magellanic cloud Cepheid standards provide a 1% foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond LambdaCDM. ArXiv, 1903.07603, 2019

nature
© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 571, S. 458–459, 2019

KATALYSE

EIN NEUER WEG ZU KUNSTDÜNGERN

Ammoniak ist als Grundlage für Düngemittel lebenswichtig für unzählige Menschen. Seine Herstellung kostet jedoch viel Energie, erzeugt reichlich CO_2 und erfordert hohe Anfangsinvestitionen. Nun deutet eine neue faszinierende Reaktion darauf hin, dass es energieeffiziente Alternativen geben könnte.

Die weltweite Nahrungsmittelproduktion ist auf große Mengen an Dünger angewiesen. Für dessen Herstellung benötigt man Ammoniak (NH_3), das wiederum aus Stickstoff (N_2) und Wasserstoff (H_2) synthetisiert wird. Obwohl die beteiligten Moleküle sehr einfach aufgebaut sind, ist es eine große Herausforderung, die starke Stickstoff-Stickstoff-Dreifachbindung (N≡N) im Stickstoffmolekül zu spalten und gleichzeitig Stickstoff-Wasserstoff-Bindungen (N–H) zu knüpfen. Die Reaktion verläuft typischerweise unter Bedingungen, die viel Energie benötigen, etwa hohe Reaktionstemperaturen und Drücke. Eine Forschungsgruppe um Yuya Ashida von der Universität Tokio hat nun gezeigt, dass sich mit einer Samariumverbindung vermischt mit Wasser und in Kombination mit einem Molybdänkatalysator Ammoniak aus Stickstoff unter Umgebungsbedingungen herstellen lässt.

Angetrieben durch einen drohenden weltweiten Mangel an Düngemitteln zu Beginn des 20. Jahrhunderts (und später durch Munitionsknappheit, weil aus Ammoniak auch Sprengstoffe hergestellt werden können), demonstrierten die Chemiker Fritz Haber und Carl Bosch als Erste, dass Stickstoff aus der Luft in Ammoniak umgewandelt werden kann. Bei der modernen

Variante des nach ihnen benannten Haber-Bosch-Prozesses vereint man Stickstoff und Wasserstoff mit Hilfe eines Katalysators auf Eisenbasis zu Ammoniak (siehe »Drei Ansätze zur Herstellung von Ammoniak«, unten, A). Heute werden so weltweit etwa 250 bis 300 Tonnen des Stoffs pro Minute erzeugt. Der daraus hergestellte Dünger kommt fast 60 Prozent der Weltbevölkerung zugute.

Die Reaktion benötigt allerdings Temperaturen von über 400 Grad Celsius und Drücke von rund 300 Bar. Chemiker suchen daher alternative Katalysatoren, auch, um den Investitionsaufwand für den Bau von Fabriken und die CO_2-Emissionen zu senken – nicht nur bei der Ammoniaksynthese selbst, sondern auch bei der Herstellung des benötigten Wasserstoffs.

Wie so oft lassen sich Chemiker dazu von der Natur inspirieren, in diesem Fall speziell von der Enzymfamilie der Nitrogenasen. Diese sind größtenteils für die biologische Umwandlung von Stickstoff in Ammoniak (die so genannte Stickstofffixierung) verantwortlich und machen so die Stickstoffatome für Aminosäuren und Nukleotide, die Grundbausteine des Lebens, verfügbar. Anders als im Haber-Bosch-Prozess beziehen Nitrogenasen die benötigten Wasserstoffatome jedoch nicht aus Wasserstoffgas. Stattdessen übertragen sie Protonen (Wasserstoffionen, H^+) und Elektronen auf Stickstoffatome, um N–H-Bindungen zu knüpfen (siehe »Drei Ansätze zur Herstellung von Ammoniak«, B). Dabei verwenden die Nitrogenasen pro Distickstoffmolekül je acht Protonen und Elektronen – statt der jeweils sechs, die eigentlich notwendig sind –, um die Fixierung und andere damit gekoppelte Prozesse anzutreiben. Daher verbrauchen die Nitrogenasen sehr viel mehr Energie, als tatsächlich für die Fixierung nötig ist. Man spricht von einem großen »chemischen Überpotenzial«.

Wissenschaftler ahmen die Nitrogenasereaktion nach, indem sie Protonen- und Elektronenquellen an Metallkomplexe andocken lassen, in denen Stickstoffmoleküle gebunden sind. Beispielsweise hat die Arbeitsgruppe um Ashida 2017 die Stickstofffixierung mit Molybdänkomplexen katalysiert, wobei jeder der Komplexe 230 Ammoniakmoleküle umgesetzt hat. Allerdings geht die Reaktion mit einem substanziellen Überpotenzial einher – in einigen Fällen benötigt man pro Mol eingesetzten Stickstoffs 300 Kilokalorien mehr als für die eigentliche Reaktion.

Perfektes Zusammenspiel

Bei der Suche nach neuen Katalysatoren gilt es, die besten Elemente aus den biologischen und industriellen Ansätzen für die Stickstofffixierung zu kombinieren: Man muss einen Prozess finden, der nahe an Umgebungsdruck und -temperatur arbeitet, ein minimales chemisches Überpotenzial aufweist und keine teure Fabrik erfordert, um Ammoniak in großem Maßstab herzustellen. Bislang hat man jedoch noch keine Kombination aus Säuren (Protonenquellen) und reduzierenden Verbindungen (Elektronenquellen) gefunden, die eine mit der von Wasserstoffgas vergleichbare Triebkraft für die Fixierung liefert und gleichzeitig reaktiv genug ist, um aus N_2 bei annähernd Umgebungstemperatur N–H-Bindungen zu knüpfen.

Die japanische Forschungsgruppe hat nun Protonen und Elektronen dazu

Drei Ansätze zur Herstellung von Ammoniak

A

$$N_2 + 3\,H_2 \xrightarrow[>400\,°C,\ \sim 400\ Bar]{Eisenkatalysator} 2\,NH_3$$

- hohe Temperatur und hoher Druck
- thermodynamisch ideal

Bei der industriellen Synthese von Ammoniak nach dem Haber-Bosch-Verfahren reagiert Stickstoffgas (N_2) mit Wasserstoffmolekülen (H_2), in der Regel in Anwesenheit eines Eisenkatalysators. Der Prozess erfordert hohe Temperaturen und Drücke, ist thermodynamisch jedoch ideal – es wird kaum Energie für Nebenreaktionen verschwendet.

B

$$N_2 + 8\,e^- + 8\,H^+ \xrightarrow[ATP \rightarrow ADP]{Nitrogenase} 2\,NH_3 + H_2$$

- Umgebungsbedingungen
- hohes chemisches Überpotenzial

Nitrogenase katalysiert die Reaktion von N_2 mit je sechs Elektronen (e^-) und Protonen (Wasserstoffionen; H^+) unter Umgebungsbedingungen zu Ammoniak. Je zwei weitere Elektronen und Protonen bilden ein H_2-Molekül, und die Umwandlung von ATP (dem Treibstoff der Zelle) in ADP treibt die Reaktion an. Der Prozess hat ein hohes chemisches Überpotenzial: Er verbraucht sehr viel mehr Energie, als für die eigentliche Ammoniaksynthese benötigt wird.

C

- Umgebungsbedingungen
- Strategie für geringe Überpotenziale?

Eine Mischung aus Wasser und Samariumdiiodid (SmI_2) wandelt Stickstoff in Anwesenheit eines Molybdänkatalysators unter Umgebungsbedingungen in Ammoniak um. Das SmI_2 schwächt die Sauerstoff-Wasserstoff-Bindungen im Wasser und liefert so Wasserstoffatome (rot), die mit Stickstoff reagieren. Dieser neue Ansatz könnte es ermöglichen, Reaktionen mit geringem Überpotenzial zu entwickeln.

NATURE: BEZDEK, M.J., CHIRIK, P.J.: A FRESH APPROACH TO AMMONIA SYNTHESIS. NATURE 568, 2019, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

gebracht, zusammenzuarbeiten anstatt wie bisher separat zu wirken. Die Wissenschaftler nutzen ein Phänomen, das als »koordinative Bindungsschwächung« bekannt ist und hier durch das Zusammenspiel von Samariumdiiodid (SmI_2) und Wasser zu Stande kommt (siehe »Drei Ansätze zur Herstellung von Ammoniak«, C).

Freie Wassermoleküle besitzen starke, schwer zu spaltende Sauerstoff-Wasserstoff-Bindungen (O–H-Bindungen). Nähert sich das Wassermolekül jedoch SmI_2 und stellt diesem ein freies Elektronenpaar teilweise zur Verfügung, schwächt das die O–H-Bindungen, und man kann die Wasserstoffatome leicht abtrennen. Da das Wasserstoffatom aus einem Elektron und einem Proton besteht, stellt der Vorgang somit sowohl Protonen als auch Elektronen bereit. Die Forscher nutzen diese Quelle und kombinieren sie mit einem Molybdänkatalysator, der Stickstoff fixiert.

Dass dieser Katalysator die Ammoniaksynthese in wässriger Lösung ermöglicht, ist insofern bemerkenswert, als Molybdänkomplexe in Wasser oft zerfallen. Darüber hinaus eröffnet die Schwächung der O–H-Bindung einen neuen Weg, Stickstoff unter Umgebungsbedingungen zu fixieren, und zwar ohne potenziell gefährliche Kombinationen von Protonen- und Elektronenquellen, die sich spontan entzünden können. Der Ansatz der Japaner funktioniert auch, wenn sie Ethylenglykol statt Wasser verwendeten, was die Bandbreite an möglichen Quellen für Wasserstoffatome erweitert.

Kurz erklärt: Ammoniaksynthese

Seit gut 100 Jahren stellt man Ammoniak (NH_3) industriell im so genannten Haber-Bosch-Verfahren her. Dabei lässt man Stickstoff (N_2) aus der Luft und Wasserstoff (H_2) an einem Eisenkatalysator miteinander reagieren:

$N_2\,(g) + 3\,H_2\,(g) \rightleftharpoons 2\,NH_3\,(g) \quad \Delta H_R = -92$ kJ/mol

Dieser eigentlichen Reaktion sind zahlreiche Schritte vorgeschaltet: So muss zum einen Wasserstoff produziert, zum anderen der Stickstoff aus der Luft abgetrennt werden, um das reine Gas zu erhalten. Außerdem entfernt man Kohlendioxid und Kohlenmonoxid (das bei der Herstellung von H_2 entsteht), da diese Gase den Katalysator vergiften würden. Erst dann kann man Stickstoff und Wasserstoff zur Reaktion bringen.

Man schätzt, dass ein bis drei Prozent des gesamten weltweiten Energiebedarfs auf die Ammoniaksynthese entfallen. Pro hergestellter Tonne NH_3 entstehen durchschnittlich zwei Tonnen CO_2. Dieser Wert ist aber nur eine Rundung, denn es kommt bei der Bilanz stark darauf an, wie der eingesetzte Wasserstoff produziert wird. Je nach Verfahren kommt man tatsächlich auf 1,4 bis 2,6 Tonnen Kohlenstoffdioxid pro Tonne Ammoniak.

Etwa vier Fünftel des hergestellten Ammoniaks gehen in die Düngemittelproduktion. Die verbleibenden 20 Prozent verwendet die chemische Industrie, um unterschiedlichste Produkte herzustellen – von Farben, Lacken oder Schaumstoffen über Pflanzenschutzmittel und Medikamente bis hin zu Raketentreibstoff.

Noch ist der Aufwand groß

Die Wissenschaftler vermuten, dass in ihrem Prozess der Molybdänkatalysator zuerst an das Stickstoffmolekül koordiniert, die Dreifachbindung spaltet und anschließend einen so genannten Molybdännitridokomplex bildet, der eine Molybdän-Stickstoff-Dreifachbindung enthält. Anschließend überträgt das SmI_2-Wasser-Gemisch einzelne Wasserstoffatome auf diesen Komplex, was schließlich Ammoniak ergibt. Das Samariumdiiodid sorgt auch dafür, dass das Molybdän in seiner reduzierten Form bleibt und in der wässrigen Lösung kein schädliches Molybdänoxid bildet. Allerdings: Stickstoff-Wasserstoff-Bindungen mit Hilfe des Molybdännitridokomplexes zu knüpfen, ist schwierig, weil diese ebenfalls geschwächt werden, wenn der Stickstoff an Molybdän gebunden ist, wie unsere Gruppe festgestellt hat. An dieser Stelle könnte wertvolle Energie verloren gehen.

Gegenwärtig eignet sich die vorgestellte Methode noch nicht für die industrielle Ammoniaksynthese: Sie verbraucht große Mengen an Samariumdiiodid und erzeugt so eine Menge Abfall. Außerdem kostet es viel Energie, das Ammoniak von der wässrigen Lösung abzutrennen; pro Mol Stickstoff werden immer noch etwa 140 Kilokalorien mehr verbraucht als für die eigentliche Reaktion notwendig. Dennoch schafft die Arbeit ein neues Feld, auf dem Chemiker Methoden für die Ammoniaksynthese erkunden können. Zukünftige Forschung sollte sich darauf fokussieren, Alternativen für Samariumdiiodid zu finden, die auf häufiger vorkommenden Metallen basieren. Diese Substanzen sollten die O–H-Bindungsschwächung begünstigen, die Knüpfung von N–H-Bindungen ermöglichen und den Energieaufwand senken, um Ammoniak aus Luft und Wasser herzustellen. ◂

Máté J. Bezdek und **Paul J. Chirik** forschen im Fachbereich Chemie der Princeton University in New Jersey, USA.

QUELLEN

Ashida, Y. et al.: Molybdenum-catalysed ammonia production with samarium diiodide and alcohols or water. Nature 568, 2019

Eizawa, A. et al.: Remarkable catalytic activity of dinitrogen-bridged dimolybdenum complexes bearing NHC-based PCP-pincer ligands toward nitrogen fixation. Nature Communications 8, 2017

nature
© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 568, S. 464–465, 2019



SPRINGERS EINWÜRFE
KLIMAWANDEL AUF YOUTUBE

Onlinevideos zeigen nicht nur drollige Katzen, private Sangeskünste oder wie man sich hübsch macht. Sie verbreiten auch nützliches Wissen – und blühenden Unsinn.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

▸▸ spektrum.de/artikel/1669376

Netzforscher analysieren gern ausgiebig die sozialen Medien Twitter und Facebook, um Aufschluss darüber zu gewinnen, wie sich Meldungen und Meinungen verbreiten. Währenddessen gibt es kaum Erkenntnisse über die vom Videoportal Youtube transportierten Inhalte.

Nach seiner Gründung 2005 galt das Portal eher als Spielwiese für Selbstdarsteller, als Filmclip- und Musikarchiv. Doch mit der Zeit stiegen die Besucherzahlen (»Views«) bei zunächst fürs Fernsehen produzierten Wissenschaftsvideos, bei Vorlesungsmitschnitten, aber auch bei eigens für Youtube gefilmten Fachkursen in schwindelnde Höhen. Und spätestens seit der Webvideoproduzent Rezo mit einem knapp einstündigen, zur Europawahl im Mai 2019 ins Netz gestellten Video bald an die 16 Millionen Besucher erreicht hat, muss auch die politische Öffentlichkeit erkennen: Youtube ist als Meinungsmedium ernst zu nehmen.

Der wirkungsmächtigste Abschnitt in Rezos Video bezieht sich auf den Klimawandel. Rezo stellt einerseits den Konsens der einschlägigen Forschung heraus, welche die anthropogene Erderwärmung einhellig als Tatsache betrachtet, und zeigt andererseits, wie manche Politiker den menschlichen Einfluss bezweifeln oder sich aus der Affäre ziehen, indem sie bloße Lippenbekenntnisse zu einer aktiveren Klimapolitik ablegen.

Wie stellt sich der Klimawandel überhaupt auf Youtube dar? Der Frage ist der Soziologe und Kommunikationsforscher Joachim Allgaier von der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen systematisch nachgegangen *(Frontiers in Communication 4, 36, 2019).*

Anhand von zehn Suchbegriffen – von »Climate« und »Climate Engineering« über »Climate Hacking« bis zu »Chemtrails« – filterte Allgaier die jeweils 20 am häufigsten geklickten Clips heraus und analysierte diese 200 Videos inhaltlich gemäß ihrem Bezug zum Forschungsstand. Überraschenderweise widersprach die Mehrheit der Stichprobe (107 Videos) dem wissenschaftlichen Konsens: 16 Videos leugneten glattweg den menschengemachten Klimawandel, und 91 verbreiteten Verschwörungstheorien – insbesondere die Behauptung, finstere Mächte manipulierten das Erdklima durch so genannte Chemtrails, die als Kondensstreifen von Flugzeugen am Himmel erscheinen.

Insgesamt hielten sich die Besucherzahlen bei Videos, die den anthropogenen Klimawandel als Realität behandelten, und bei solchen, die ihn leugneten, mit je rund 17 Millionen die Waage. Allerdings erfassen Allgaiers Zahlen nur den Stand bis zum Jahr 2015. Allein das Rezo-Video von 2019 mit seinen fast 16 Millionen Views würde den früheren Gleichstand von Pro und Kontra kippen.

Somit lässt sich aus der RWTH-Studie sogar eine gute Nachricht herauslesen. Sehr viele Youtube-Videos zum Klimawandel sind professionell gemacht, vertreten den Mainstream der Forschung und werden häufig angeklickt. Das weckt die Hoffnung, dass der wissenschaftliche Konsens im Videoportal mit der Zeit die Oberhand gewinnt; dazu kann offenbar schon ein einzelner Youtuber, der so lebhaft und schlüssig argumentiert wie Rezo, entscheidend beitragen.

Freilich enthält die Studie ebenfalls eine schlechte Nachricht. Wie Allgaier zeigt, geraten relativ neue Suchbegriffe wie »Climate Engineering«, »Climate Modification« und »Geoengineering« gleich in den Sog von pseudowissenschaftlichen Spekulationen und Verschwörungstheorien vom Chemtrail-Typ. Ob es gelingen kann, diese noch vieldeutigen, auch wissenschaftlich umstrittenen Begriffe in Youtube-Filmen seriös zu diskutieren, muss die Zukunft zeigen.

MEERESBIOLOGIE

DAS INNENLEBEN DER DELFINE

Experimente in Delfinarien haben früh die erstaunlichen kognitiven Fähigkeiten der Meeressäuger offenbart. Doch erst jahrzehntelange Beobachtungen in freier Wildbahn enthüllen, in welch komplexem sozialem Gefüge die intelligenten Tiere leben.



Fabienne Delfour ist promovierte Verhaltensforscherin am Laboratoire d'Ethologie Expérimentale et Comparée der Université Paris 13, wissenschaftliche Leiterin des Delfinariums des Parc Astérix in Plailly und wirkt am Wild Dolphin Project mit.

spektrum.de/artikel/1669378

Es ist fast acht Uhr abends, unser Schiff liegt in den türkisfarbenen Gewässern der Bahamas vor Anker. Die Mannschaft des Wild Dolphin Project bereitet sich auf den Feierabend vor, als der Ausguck die Sichtung von Zügeldelfinen *(Sternella frontalis)* meldet. Eine kleine Schar nähert sich unserem Boot: zwei erwachsene Weibchen mit vier Jungen. Wir gehen ins Wasser, um sie zu filmen. Kurze Zeit später schwimmen die beiden Muttertiere davon und lassen uns mit dem Nachwuchs allein. Erst nach gut zehn Minuten tauchen sie wieder auf, holen die Jungtiere ab und kehren mit ihnen gemächlich zur großen Gruppe zurück.

An diese Episode vor wenigen Jahren erinnere ich mich noch sehr gut. Ich fand es damals ziemlich seltsam, dass wilde Tiere ihre Jungen unter menschliche Aufsicht stellen. Vermutlich gingen die Weibchen schlicht davon aus, dass ihrem Nachwuchs keine Gefahr drohte. Tatsächlich beobachten wir diese Delfingruppe bereits seit drei Jahrzehnten – Tiere und Forscher kennen und erkennen sich daher gleichermaßen.

Seit 1985 folgen die Wissenschaftler des Wild Dolphin Project unter der Leitung von Denise Herzing an mehr als 100 Tagen im Jahr Zügeldelfinen sowie auch Großen Tümmlern *(Tursiops truncatus)* und haben so beträchtliche Datenmengen über das Leben dieser Gruppen gesammelt. Anhand bestimmter körperlicher Merkmale wie Narben oder farbigen Flecken lassen sich mittlerweile mehrere hundert Individuen unterscheiden. DNA-Analysen ihrer Ausscheidungen verraten, welches Tier mit wem Nachwuchs zeugte. Delfine können über 40 Jahre alt werden – manche von ihnen kennt die Mannschaft somit seit Beginn der Studie.

Die Wissenschaftler des Wild Dolphin Project führen nicht als Einzige Langzeitstudien zu Delfinen durch. Zwei weitere Projekte, eines unter der Leitung von Bernd Würsig von der Texas A&M University, das andere koordiniert von Richard Connor von der University of Massachusetts in Dartmouth, verfolgen Populationen von Großen Tümmlern

PCLARK2 / GETTY IMAGES / ISTOCK

AUF EINEN BLICK
MEERESSÄUGER UNTER BEOBACHTUNG

1. Seit Jahrzehnten verfolgen Meeresbiologen Delfingruppen in freier Wildbahn. Die Tiere haben sich an die Forscher gewöhnt und lassen sich daher ungestört beobachten.

2. Delfine kommunizieren über Pfeif- und Klicklaute. Neu entwickelte Techniken registrieren, welches Individuum in welcher Situation bestimmte Töne erzeugt.

3. Verhaltensstudien in Delfinarien ergänzen die Freiwasserbeobachtungen. Dabei konnten bei den Meeressäugern sogar Persönlichkeitseigenschaften wie die Neigung zu Optimismus nachgewiesen werden.

Delfine schließen sich in bestimmten Phasen ihres Lebens je nach Geschlecht, Alter und Vorlieben zu Gruppen zusammen.

PCLARK2 / GETTY IMAGES / ISTOCK

seit mehreren Jahrzehnten. Parallel dazu entstanden seit den 1960er Jahren zahlreiche Studien über die Biologie, das Verhalten und die Ökologie der Meeressäuger sowohl in freier Wildbahn als auch in Delfinarien. Da sich ein experimentelles Protokoll unter kontrollierten Bedingungen einfacher bei Tieren in Gefangenschaft durchführen lässt, finden dort vor allem Studien über die kognitiven Fähigkeiten der Tiere statt, indem man sie mit bestimmten Aufgaben konfrontiert. Dabei demonstrieren sie ein auditives und visuelles Kurzzeitgedächtnis, das mit dem eines Affen vergleichbar ist. So können sie sich ein Geräusch oder auch eine Reihe von Tönen merken und später wiedererkennen. Zudem zeichnen sie sich durch eine außergewöhnliche Lernfähigkeit aus: Sie verstehen Befehle, die ihnen der Trainer zeigt oder ausspricht, folgen dem Blick eines Menschen oder imitieren Geräusche und Gesten anderer Delfine oder Menschen. Die zwei unterschiedlichen Forschungsansätze, Freiwasserbeobachtungen und Verhaltensstudien im Delfinarium, gehen somit Hand in Hand, wobei Erstere meist auf dem Niveau der Gruppe ansetzen, während Letztere eher die Individuen im Fokus haben.

Auf Grund von Freiwasserstudien wissen wir seit Ende der 1970er Jahre, dass die Delphinidae – wie die 30 bis 40 Arten umfassende Familie der Zahnwale wissenschaftlich genannt wird – zum Großteil in polygynen Gesellschaften leben, in denen sich die Männchen mit mehreren Weibchen paaren. Je nach Geschlecht, Alter, Fortpflanzungsstatus oder Aktivität kooperieren einzelne Individuen und trennen sich dann wieder, was Verhaltensforscher als Fission-

Fusion-Gesellschaft bezeichnen. Jugendliche Männchen suchen sich in der Regel einen Spielgefährten, mit dem sie lebenslang verbunden bleiben. Kameradschaftlich verbunden durchläuft das Paar Seite an Seite die Unwägbarkeiten des Lebens; nur ganz selten wird sich ein drittes Männchen hinzugesellen. Die Weibchen hingegen agieren wesentlich freier – oder opportunistischer. Trächtige Tiere neigen dazu, sich mit anderen zu verbinden; genauso machen es Mütter mit Nachwuchs. Verliert ein Weibchen sein Junges, kehrt es in die Gruppe der Junggesellinnen zurück.

Über die soziale Intelligenz der Delfine wissen wir dagegen bisher recht wenig. Versuche in Delfinarien geben nur begrenzt Einblick in die Interaktionen der Tiere untereinander, und ihre natürliche Umwelt schränkt die Forscher in vielerlei Hinsicht ein. Doch Langzeitbeobachtungen verschiedener Populationen sowie neue Techniken liefern inzwischen genauere Hinweise darauf, wie sich ein einzelnes Individuum innerhalb einer Gruppe verhält und wie die Gesellschaft der Delfine funktioniert.

Aus Studien in Delfinarien kennen wir die erstaunlichen Sinnesleistungen der Delfine. Neben einem sehr feinen Gehör besitzen sie einen ähnlich guten Sehsinn wie Katzen und Hunde. Angepasst an die schwachen Lichtverhältnisse sowie die Blautönung des Ozeans können die Tiere damit unter Wasser in der Nähe gut sehen, während sie an der Luft auch weiter entfernte Objekte ausmachen.

Als die Vorfahren der Wale zum Leben ins Wasser zurückkehrten – ihre nächsten lebenden Verwandten sind Flusspferde (siehe »Mein Vetter, das Nilpferd«, oben) –, erforderte das zahlreiche anatomische und physiologische Anpassungen. Die meisten Veränderungen traten wohl im Hörsystem auf. Schallwellen breiten sich im Wasser etwa fünfmal schneller aus als in der Luft, wobei die tiefen Frequenzen im Unterschied zu den hohen viele Kilometer weit wandern können. Statt einer äußeren Ohrmuschel verbleibt den Meeressäugern nur eine kleine Öffnung, die mit dem Innenohr verbunden ist. Töne nehmen sie jedoch hauptsächlich über den Unterkiefer wahr.

Der akustische Kommunikationskanal ist für Delfine sicherlich der wichtigste. Hierüber halten sie ihre Gruppe zusammen und koordinieren die sozialen Aktivitäten der Individuen. Mit den Stimmlippen in den Nasengängen (siehe Grafik links) produzieren sie drei verschiedene Tonarten: Klicks zur Echoortung, Pfeiftöne sowie Explosivpulslaute. Letztere beinhalten Geräusche wie Knarren, Schnattern oder Quietschen, die bei Balz, sexuellen Spielen, Aggression oder Angst geäußert werden. Pfeiftöne gelten als am besten untersucht, da sie sich leicht unterscheiden und anhand von Sonogrammen klassifizieren lassen. Die zwischen 0,1 und 4 Sekunden dauernden Töne bestehen aus einer Basisfrequenz mit mehreren Obertönen und reichen von 2 bis 20 Kilohertz; beim Großen Tümmler umfassen sie sogar 800 Hertz bis 28,5 Kilohertz. Dabei produziert jeder Delfin einen ganz individuellen Pfeifton, den Signaturpfiff. Wie eine Art Personalausweis identifiziert dieser das Individuum innerhalb der Gruppe.

Mittels Echoortung aus hochfrequenten Klicklauten mit einer Frequenz zwischen 110 und 130 Kilohertz navigieren die Tiere und stöbern ihre Beute auf. Dabei können sie Klicks und Pfeiftöne gleichzeitig erzeugen. Manche Delfinarten besitzen neben dem aktiven auch ein passives Sonar. Ersteres beschränkt sich auf die Echoortung: Der Delfin sendet einen Ton aus und wertet das zurückgeworfene Echo aus, um eine Beute anzuvisieren oder um genauere

Mein Vetter, das Nilpferd

Wie die Pott- und Schweinswale gehören Delfine zu den Zahnwalen (Odontoceti), einer der beiden Unterordnungen der Wale, die im Gegensatz zu den Bartenwalen Zähne besitzen. Die Unterordnung umfasst rund 70 Arten, verteilt auf neun Familien. Eine davon sind die Delfinidae mit mehr als 30 Arten wie dem Großen Tümmler oder dem Zügeldelfin. Wale haben als Säugetiere eine spektakuläre Evolution durchlaufen: Ihre Vorfahren lebten vor etwa 50 Millionen Jahren an Land und passten sich nach und nach an eine Existenz unter Wasser an. Ihre nächsten heute lebenden Verwandten sind Flusspferde.

Delfine produzieren Laute mit zwei Paar Stimmlippen, die an den beiden Nasengängen liegen. Diese weiten sich in mehrere Höhlen, die Nasalsäcke, und münden schließlich am Blasloch oben auf dem Kopf. Töne registrieren die Tiere über ihren Unterkiefer.

NACH CRANFORD, T.W. ET AL.: FUNCTIONAL MORPHOLOGY AND HOMOLOGY IN THE ODONTOCETE NASAL COMPLEX: IMPLICATIONS FOR SOUND GENERATION. JOURNAL OF MORPHOLOGY 228, 1996 / POUR LA SCIENCE JULI 2018

Informationen über ein Objekt zu erhalten. Beim 2007 entdeckten passiven Sonar hört der Delfin nur zu, ohne selbst einen Ton zu erzeugen. Er kundschaftet quasi die Geschehnisse in seiner Umgebung aus, indem er die Echos der Klicks seiner Artgenossen belauscht.

Abhöreinrichtung mit Rundumblick

Bioakustiker nehmen seit etlichen Jahren Lautäußerungen der Tiere sowohl in ihrer natürlichen Umwelt als auch in Delfinarien auf, um zu entschlüsseln, welche Botschaft in welchem Kontext auftritt. Damit sollte es möglich werden, die intraspezifische Kommunikation dieser Tiere zu verfolgen und zu verstehen. Doch bislang ließ sich nicht feststellen, welches Individuum gerade einen Ton aussendet. Schließlich brauchen die Tiere nicht ihre Schnauze zu öffnen, wenn sie Geräusche erzeugen, da sie diese über die so genannte Melone am Vorderteil des Kopfs produzieren. Ohne sichere Identifizierung des Signalerzeugers, der Signalart sowie des Empfängers lässt sich tierische Kommunikation aber kaum erforschen.

Wir haben deshalb eine Vorrichtung gebaut, mit der wir die Meeressäuger in einem Rundumblick von 360 Grad filmen und deren Laute über vier Hydrofone im dreidimensionalen Raum aufnehmen können (siehe »Wer spricht?«, S. 37). Über eine Software identifizieren wir im Nachhinein auf den Videos den Delfin, der die Töne erzeugt hat. Damit können wir jetzt seine Körperbewegungen sowie die Reaktionen seiner Artgenossen analysieren. Im Gegensatz zu den bislang benutzten Kameras, die nur auf einen Delfin oder eine kleine Gruppe fokussieren können, erfasst das 360-Grad-System die gesamte Szenerie: Alles, was sich im dreidimensionalen Raum abspielt, wird gleichzeitig gefilmt und aufgezeichnet.

Dieses »BaBeL« genannte System (Bio-acoustique, Bien-être et Langage, zu Deutsch etwa: Bioakustik, Wohlbefinden und Sprache) lässt sich recht einfach vom Schiff aus einsetzen und entspricht unserer Forschungsphilosophie: so unaufdringlich wie möglich. Die Delfine entscheiden selbst, ob sie näher kommen wollen oder nicht, und sie beginnen oder beenden eine Interaktion absolut eigenständig. Leider funktioniert das System bislang nur bei Klicks; bei Pfiffen und Pulslauten kann es den Sender noch nicht ausmachen, da diese Signalarten im Vergleich zu den Klicks eine extrem variable Struktur aufweisen, so dass sie sich wesentlich schwerer aufspüren lassen.

Mit BaBeL konnten wir bereits ein erstaunliches Verhalten beobachten: Eine Delfingruppe, die sich schwimmenden Menschen nähert, schickt zunächst einen lautlosen Späher vor. Erst das folgende Tier sendet Klicks für die Echoortung aus. Der erste Delfin agiert also inkognito und reagiert auf die Echos seines Artgenossen. Diesen Einsatz passiver Echoortung hatten wir nicht erwartet.

Die taktile Kommunikation spielt bei den Delfinen ebenfalls eine sehr große Rolle. Die Tiere lieben es, sich zart



FABIENNE DELFOUR

Um Persönlichkeitseigenschaften eines Delfins zu analysieren, präsentieren Forscher ihm einen Behälter, der einen Fisch als Belohnung enthält – oder auch nicht. Ein »optimistisch« veranlagtes Tier schwimmt schnurstracks zum Ziel, während sich ein »Pessimist« dabei etwas mehr Zeit lässt.

aneinander zu reiben. Solche Streicheleinheiten lassen sich sowohl in den Delfinarien als auch in freier Wildbahn beobachten. 2017 analysierten Kathleen Dudzinski vom Dolphin Communication Project in Florida und Christine Ribic von der University of Wisconsin die Kontakte der Brustflossen bei drei Delfinarten: beim Zügeldelfin vor den Bahamas, beim Großen Tümmler in der Lagune des Roatan Institute for Marine Sciences (Honduras) sowie beim Indopazifischen Großen Tümmler *(Tursiops aduncus)* rund um die japanische Insel Mikura. Alle drei Arten verhalten sich hierbei ähnlich. Offensichtlich stärken die Hautkontakte das Zugehörigkeitsgefühl innerhalb der Gruppe und ähneln damit der gegenseitigen Fellpflege bei Primaten. Erwachsene Weibchen bleiben dabei meist unter sich, während die Männchen das Verhalten auch gegenüber Jungtieren zeigen. Wie die beiden Biologinnen vermuten, versuchen vor allem männliche Tiere mit dem Flossenkraulen, neue Bindungen zwischen den Individuen aufzubauen und bestehende aufrechtzuerhalten. Im Konfliktfall kommt es dagegen vor, dass sie sich mit der Schwanzflosse schlagen oder sich gegenseitig beißen.

Visuell kommunizieren Delfine ebenfalls, etwa über Luftsprünge, Maulaufreißen oder der typisch s-förmigen Körperhaltung im Konfliktfall oder bei der Balz. Auch mittels der durch das Luftloch ausgestoßenen Blasen zeigen die Tiere, wie erregt sie sind.

Lange glaubte man, Delfine nutzten ausschließlich den Hör-, Seh- und Tastsinn. Den Tieren wurde lediglich zugetraut, die vier Grundgeschmäcker süß, sauer, salzig und bitter unterscheiden zu können. Und ein Riechsystem scheint bei den Meeressäugern gänzlich überflüssig zu sein; olfaktorische Strukturen tauchen zwar in embryonalen Stadien auf, werden dann aber wieder zurückgebildet. In den letzten Jahren stellte sich allerdings heraus, dass die Chemie bei der Kommunikation doch eine wichtige Rolle spielt: Wie französische Forscher um Alban Lemasson von der Université de Rennes 2016 entdeckten, sind Delfine durchaus in der Lage, Geruchs- und Geschmackssignale aufzuspüren und zu differenzieren.

Die Forscher hatten in einem Delfinarium bei Nantes einen durchlöcherten Kanister mit verschiedenen Leckereien sowie daneben ein identisches, jedoch leeres Behältnis befestigt. Die Tümmler hielten sich viel länger beim vollen Kanister auf – offenbar nahmen sie den daraus entströmenden Geruch wahr. In einem zweiten Experiment präsentierten die Wissenschaftler ihren Delfinen Eiswürfel mit ihrem Lieblingsfutter Hering, mit Garnelen – was die Tiere nicht kannten – sowie futterfreie Exemplare. Sobald die Pfleger die Eiswürfel ins Wasser warfen, fraßen die Delfine zuerst die fischhaltigen Stücke, dann die mit Krabben und zuletzt die futterfreien.

Tiere mit Charakter

Bis heute wissen wir nicht, wie Delfine Geruchs- und Geschmacksreize wahrnehmen, doch offensichtlich haben die marinen Säugetiere diese Sinne nicht vollständig eingebüßt. In freier Wildbahn sieht man öfter einen Delfin, der einer urinierenden Artgenossin mit offenem Schnabel folgt. Vielleicht informiert der an chemischen Stoffen – und somit auch an Hormonen – reiche Urin die Männchen, ob ein Weibchen empfängnisbereit ist.

Delfine drücken ihre Individualität akustisch aus. Besitzen sie damit auch eine Art Persönlichkeit, so wie sich das bei Primaten oder Hunden nachweisen ließ? Das versuchten wir mit Tieren im Delfinarium des Parc Astérix im nördlich von Paris gelegenen Plailly herauszufinden. Wir erstell-



Delfine verbringen viel Zeit mit Synchronschwimmen. Das fördert vermutlich den sozialen Zusammenhalt.

BEARACREATIVE / STOCK.ADOBE.COM

Wer spricht?

Um festzustellen, welcher Delfin einen Ton produziert, haben Fabienne Delfour und ihre Kollegen eine wasserdichte Apparatur gebaut, die im 360-Grad-Winkel Bilder und Töne aufnimmt (linkes Bild). Vier an ausziehbaren Armen befestigte Hydrofone zeichnen alle von den Delfinen erzeugten Geräusche auf, während eine damit verbundene Kamera die Tiere filmt (Bilder rechts). Eine Software wertet später die Aufnahmen aus und kann so genau den Delfin identifizieren, der auf den Videos die aufgenommenen Klicks zur Echoortung ausgesendet hat.







FOTOS: FABIENNE DELFOUR

ten hierzu Charakterprofile der so genannten Big Five der Persönlichkeit, bekannt auch unter dem Akronym OCEAN: O steht für Offenheit zum Experimentieren (Englisch: openness), C für Gewissenhaftigkeit, Kontrolle und Disziplin (conscientiousness), E für Extraversion und Geselligkeit (extraversion), A für Verträglichkeit, Freundlichkeit und Altruismus (agreeableness) und schließlich N für Neurotizismus und emotionale Labilität (neuroticism).

Junge Delfine erwiesen sich als Typ O, E und A: verspielt, gesellig und voller Energie. Dagegen agierten ältere als C-Typ, die aufmerksam ihre Umgebung verfolgten und Jugendliche bei Bedarf disziplinierten. Schaute man genauer hin, dann offenbarte jedes Individuum ein ganz eigenes Profil. Außerdem konnten wir beobachten, dass Tiere mit ähnlichen Persönlichkeitszügen gern ihre Zeit miteinander verbrachten.

Forscher um den Meeresbiologen Stan Kuczaj von der University of Southern Mississippi hatten ebenfalls bestätigt, dass Delfine unterschiedliche Persönlichkeiten besitzen. So agierten Muttertiere in Delfinarien gegenüber ihrem Nachwuchs mehr oder weniger restriktiv, vorschreibend oder beschützend. Manche ließen die Jungen ihre Umgebung frei erkunden, andere straften sie, wenn sie nicht gehorchten. In freier Wildbahn habe ich Mütter gesehen, die ihre etwas zu unruhigen Jungen für mehrere Sekunden auf den Boden drückten. Andere Weibchen drehten sich auf den Rücken und fixierten so ihr Junges auf dem Bauch. Derartig festgehalten, konnte das Junge unmöglich freikommen, trotz kräftiger Schläge mit der Schwanzflosse.

In natürlicher Umgebung lassen sich nur mit Langzeitstudien Persönlichkeitsprofile erkennen. Als Doktorand am Wild Dolphin Project hat Nathan Skrzypczak von der Florida Atlantic University jene etwa 100 Delfine gefilmt, die sich mindestens 15-mal beobachten ließen. Er suchte so nach den Charakterzügen Geselligkeit, Neugierde und Mut – jeweils berechnet durch den Zeitanteil, den die Tiere mit ihren Müttern, anderen Artgenossen oder den Wissenschaftlern verbrachten. Dabei ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Männchen und Weibchen. Skrzypczak stieß jedoch auf eine Verbindung zwischen den neugierigen und den mutigen Charakteren: Die Individuen, die sich als Jungtiere häufig von ihrer Mutter entfernt hatten, um die Umgebung zu erkunden, tendierten später dazu, mehr Zeit mit den Forschern zu verbringen. Wenig überraschend hatten die mutigsten Individuen kaum Angst vor neuen Situationen.

Delfine besitzen also ein vielfältiges Sozialleben, eine nicht minder reiche sensorische Welt sowie unterschiedliche Persönlichkeiten. Doch wie sieht ihr Innenleben aus? Es ist noch nicht lange her, dass Wissenschaftler es ablehnten, Gefühle bei Tieren zu untersuchen. Das hat sich mittlerwei-

Ein sechster Sinn

2012 wies die Arbeitsgruppe von Wolf Hanke von der Universität Rostock einen elektrischen Sinn beim Guyana-Delfin *(Sotalia guianensis)* nach. Mit Elektrosensoren in kleinen Einbuchtungen am Maul – an der gleichen Stelle liegen bei anderen Säugetieren wie Katzen die Ansatzpunkte der Schnurrhaare – nimmt der in trüben Flussmündungen lebende Delfin Veränderungen des umgebenden elektrischen Feldes wahr und spürt damit Beutetiere auf. 2014 entdeckten Alban Lemasson und seine Kollegen von der Université de Rennes, dass der Große Tümmler in der Lage ist, Objekte anhand ihrer magnetischen Eigenschaften zu unterscheiden. Der Delfin könnte also mit Hilfe eines magnetischen Sinns navigieren.

le geändert. Emotionen gelten als mentaler Zustand, den ein Individuum in einer Situation je nach persönlicher Erfahrung und genetischer Veranlagung empfindet. Positive und negative Grundeinstellungen beeinflussen somit die Art und Weise, wie eine Begebenheit wahrgenommen wird: Optimisten sehen das Glas halb voll, während es Pessimisten eher als halb leer betrachten. Dieses Phänomen, als kognitive Verzerrung bezeichnet, lässt sich in entsprechenden Versuchen auch bei Tieren nachweisen. Einen solchen Test haben wir für die Delfine im Parc Astérix kreiert.

Zunächst brachten die Tierpfleger ihren Delfinen bei, auf ein Objekt zuzuhalten, das abwechselnd an zwei Orten lag und zwei verschiedene Belohnungen beinhaltete (siehe Bild S. 35): Erreichten die Tiere Position 1, lobten die Pfleger sie; an Position 2 bekamen sie einen fetten Hering. Meist beeilten sich die Delfine mehr, Position 2 zu erreichen, weil hier der leckere Fisch lockte. Dann folgte der Test: Das Objekt lag jetzt auf halbem Weg zwischen den beiden Positionen und erschien somit doppeldeutig für die Tiere. Wir stoppten die Zeit, wie lange sie brauchten, um das Ziel zu erreichen und wieder zum Tierpfleger zurückzukehren. Schnelle Schwimmer offenbarten eine »optimistische« Tendenz – die Delfine hofften offensichtlich, dort Fisch zu bekommen. Eine langsame Fortbewegung dagegen sprach eher für ein »pessimistisch« eingestelltes Individuum.

Außerdem konnten wir beobachten, dass die »Optimisten« länger zusammen mit Artgenossen schwammen. Solches Verhalten festigt vermutlich die Bindung zwischen den Delfinen. Vom Menschen wissen wir, dass gemeinsame Aktivitäten positiv stimmen – und das gilt wohl auch für Delfine. In natürlicher Umgebung lässt sich ihre emotionale Lage allerdings nur sehr schwer analysieren und bleibt uns somit verborgen. Wenn etwa im Meer ein Weibchen sein totes Junges mit sich trägt, kann man sich zwar denken, dass es trauert – doch bewiesen ist das nicht.

Für fundiertere Aussagen müssen wir unsere Versuchsprotokolle aus den Delfinarien an die natürliche Umgebung anpassen. Ein gutes Beispiel hierfür sind Spiegelexperimente. Damit möchten Verhaltensforscher herausfinden, ob ein Tier sich seiner selbst bewusst ist. Wenn es in der Lage ist, sich im eigenen Spiegelbild zu erkennen, dann zeigt dies, dass es ein Wissen über sein eigenes Erscheinungsbild besitzt. Dieses Wiedererkennen bedeutet: Das Tier identifiziert sich als Individuum, das sich von den anderen unterscheidet.

Spiegel im Meer

Das Experiment sieht nun folgendermaßen aus: Einem Tier wird ein Spiegel vorgesetzt, und man beobachtet, ob es sein Spiegelbild als Konterfei seiner selbst oder als Artgenossen behandelt. Im zweiten Schritt bringen die Versuchsleiter heimlich eine farbige Markierung an dem Individuum an. Dann schauen sie, ob es mit Hilfe des Spiegels daran reibt oder ob es den Zusammenhang nicht versteht. Menschliche Kinder bestehen ab einem Alter von etwa 18 Monaten diesen Spiegeltest. Schimpansen gelingt dasselbe im Alter zwischen zwei und drei Jahren. Und auch Elefanten oder Elstern erkennen ihre Spiegelbilder.

Rachel Morrison und Diana Reiss von der City University of New York testeten hierzu zwei Jungtiere eines New Yorker Delfinariums über einen Zeitraum von drei Jahren. Wie die Forscherinnen 2018 berichteten, reagierten beide Delfine schon sehr früh mit auf sich selbst bezogenen Verhaltensweisen: Sie rissen vor dem Spiegel das Maul auf, drehten sich auf den Rücken oder bewegten den Kopf auf und ab. Einer von ihnen fing bereits im Alter von nur sieben Monaten damit an – bei einem so jungen Tier

VKILIKOV / STOCK.ADOBE.COM



Weibchen des Großen Tümmlers kümmern sich auch nach dem Abstillen noch jahrelang um ihre Jungen.



Delfine jagen mitunter in Gruppen, wobei mehrere Tiere einen Fischschwarm zusammentreiben. Bisweilen kooperieren sie sogar mit Fischern und treiben Fische in deren Netze – ein Phänomen, das aus brasilianischen Gewässern bekannt ist.

ATESE / GETTY IMAGES / ISTOCK

wurde das zuvor noch nie beobachtet. Die Forscherinnen schließen daraus, dass das anspruchsvolle Leben im Wasser wahrscheinlich die rasche sensorische Reifung gefördert hat.

Als wir jedoch 2013 in freier Wildbahn vor den Bahamas Zügeldelfinen insgesamt 14-mal einen ins Wasser gesenkten Spiegel präsentierten, sahen die Reaktionen ganz anders aus: Eine Gruppe von Müttern mit Jungtieren schwamm um den Spiegel herum und hielt dabei Abstand. Einige Individuen ignorierten den Spiegel einfach. Ein einziges Männchen platzierte sich vor den Spiegel und nahm eine aggressive s-Stellung ein.

Offenbar reagieren die Tiere in der Natur anders auf einen Spiegel als in Gefangenschaft. Das heißt aber nicht, dass Zügeldelfine sich grundsätzlich nicht in einem Spiegel erkennen können, sondern nur, dass ein und dasselbe Objekt in unterschiedlichen Situationen eine andere Bedeutung haben kann. Wale sind Experten für akustische Signale. Ein Spiegel ist bei ihnen vielleicht nicht das beste Mittel, um ihre Selbsterkenntnis zu testen. Damit stehen die Forscher vor einer Herausforderung: einen Versuchsaufbau zu entwickeln, der einem strikten wissenschaftlichen Protokoll folgt und dabei so exakt wie möglich die Welt der Tiere enthüllt.

Die moderne Technik erlaubt es, immer kleinere Geräte zu entwickeln, mit denen sich die Tiere erforschen lassen, ohne sie zu beeinträchtigen. So lieferten an Buckelwalen befestigte Miniatursender aus der Distanz wertvolle Erkenntnisse über Geschwindigkeit und Tauchtiefe, aber auch über die akustische Kommunikation zwischen Müttern und Jungtieren. Und mittels ferngesteuerter Drohnen lassen sich Wale ungestört aus der Luft verfolgen.

Wir arbeiten daran, unser BaBeL-System weiter zu optimieren, so dass wir die komplexe Kommunikation der Delfine und anderer Walarten besser erfassen können. Damit wollen wir mit diesen Tieren nicht in einen Dialog treten, sondern verstehen, was sie sich gegenseitig sagen und wie ihre Nachrichten und Emotionen in ihrem Verhalten und ihren akustischen Äußerungen verschlüsselt sind. Mittels einer großen Datenbank aus Bild- und Tonmaterial möchten wir unterscheiden, in welchem Kontext welches Verhalten und welche Tonproduktion stattfinden. Damit halten wir dann vielleicht endlich den Schlüssel zum Sozialleben der Delfine in der Hand. ◂

QUELLEN

Clegg, I.L.K. et al.: Bottlenose dolphins engaging in more social affiliative behaviour judge ambiguous cues more optimistically. Behavioural Brain Research 322, 2017

Delfour, F., Herzing, D.: Underwater mirror exposure to free-ranging naïve Atlantic spotted dolphins *(Stenella frontalis)* in the Bahamas. International Journal of Comparative Psychology 26, 2013

Kremers, D. et al.: Sensory perception in cetaceans: Part II – Promising experimental approaches to study chemoreception in dolphins. Frontiers in Ecology and Evolution, fevo.2016.00050, 2016

Lopez-Marulanda, J. et al.: First results of an underwater 360° HD audio-video device for etho-acoustical studies on bottlenose dolphins *(Tursiops truncatus)*. Aquatic Mammals 43, 2017

Morrison, R., Reiss, D.: Precocious development of self-awareness in dolphins. PLoS One 13, e0189813, 2018

WEBLINK

www.wilddolphinproject.org

Das Wild Dolphin Project beobachtet Delfine in freier Natur.

MEDIZIN

MOLEKULARER JUNGBRUNNEN

Ein antibiotischer Wirkstoff scheint die Regeneration verletzter Körpergewebe in verblüffender Weise anzukurbeln. Jetzt muss er sich in klinischen Tests beweisen; eine große Hürde hat er hierbei bereits genommen.




Kevin Strange ist Biologe, Geschäftsführer des Biotech-Unternehmens »Novo Biosciences« und früherer Präsident der gemeinnützigen Forschungseinrichtung MDI Biological Laboratory (MDIBL) in Bar Harbor, Maine, USA. **Viravuth Yin** ist leitender Wissenschaftler bei Novo Biosciences und außerordentlicher Professor am MDIBL.

spektrum.de/artikel/1669380

CHRISTINA A. DYKEMAN UND YIN LABORATORY, MDI BIOLOGICAL LABORATORY

AUF EINEN BLICK
VERBLÜFFENDE WUNDHEILUNG

1 Stammzelltherapien gelten als große Hoffnung, wenn es um die Regeneration von Geweben und Organen geht. Bislang münden sie aber nur selten in klinische Anwendungen.

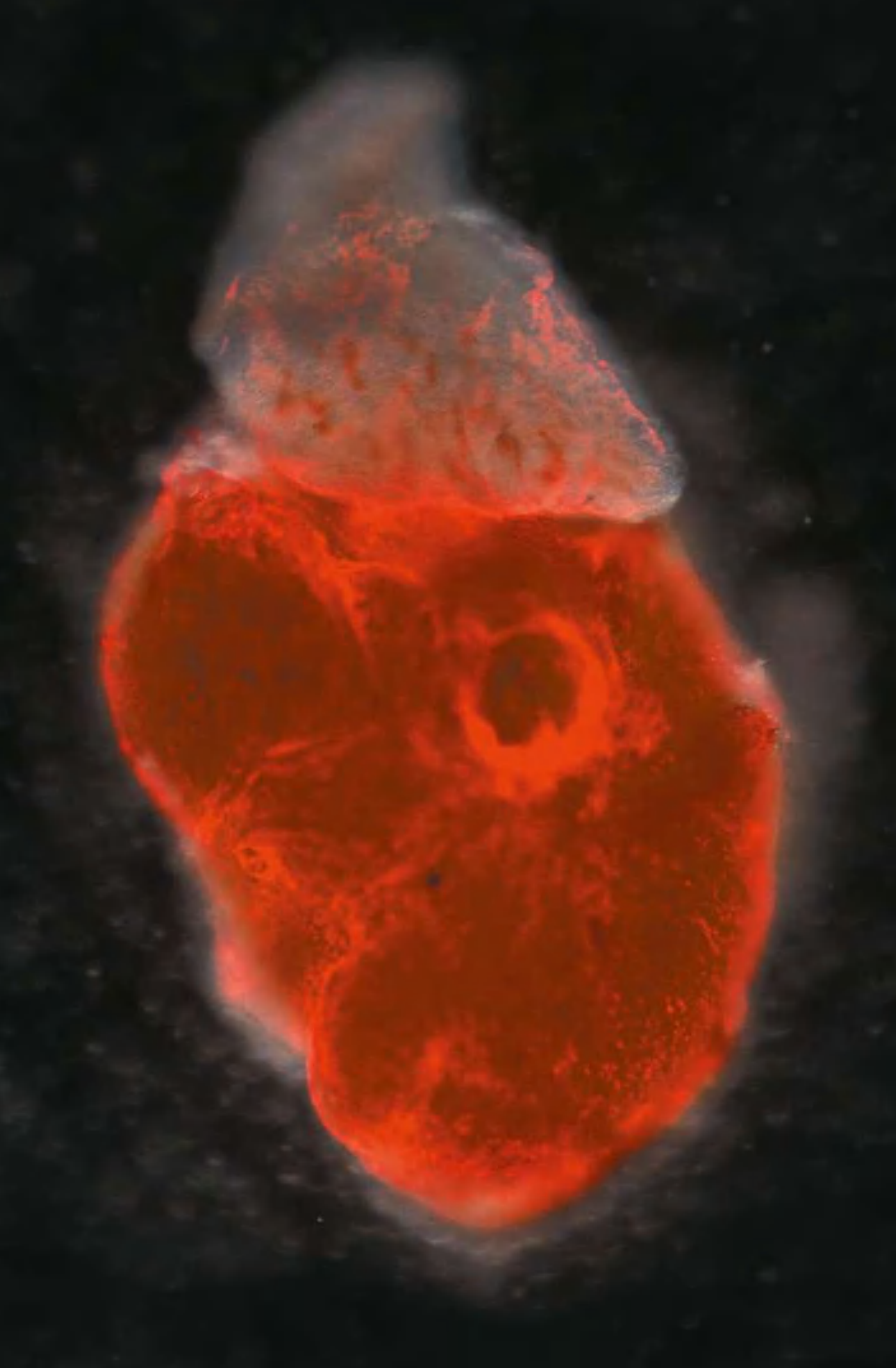
2 Eine Substanz namens MSI-1436 regt die Gewebeneubildung stark an, zumindest im Tierversuch. Sie schaltet einen Mechanismus aus, der die natürliche Regenerationsfähigkeit bremst.

3 MSI-1436 wurde ursprünglich als Mittel gegen Diabetes und Adipositas geprüft und dabei als sicher eingestuft. Einen großen Schritt in der Entwicklung als Arzneistoff hat es damit bereits hinter sich.

Manchmal lassen sich Wissenschaftler sogar von Kneipengeschichten inspirieren. Kurz nach der Jahrtausendwende war der Genetiker Michael Zasloff von der Georgetown University (Washington D.C.) nach Schottland gereist. An der dortigen University of St Andrews hielt er einen Vortrag über antibiotisch wirksame Substanzen in der Haut von Tieren. Anschließend ging er mit einigen weiteren Wissenschaftlern ein Bier trinken. Dabei erzählte ihm ein Meeresbiologe davon, dass Delfine bei Haiangriffen manchmal 45 Zentimeter lange und 12 Zentimeter tiefe Bisswunden davontragen, die erstaunlicherweise binnen wenigen Wochen abheilen – ohne Anzeichen einer Infektion.

Zasloff war verblüfft und konnte das Gespräch nicht vergessen. In den folgenden Jahren las er viele Berichte über Bisswunden bei Delfinen und nahm Kontakt zu Meeresbiologen auf, die sich mit diesen Tieren auskennen. 2011 veröffentlichte er im Fachblatt »Journal of Investigative Dermatology« einen Aufsatz mit dem Titel »Beobachtungen zu den bemerkenswerten (und mysteriösen)

CHRISTINA A. DYKEMAN UND YIN LABORATORY, MDI BIOLOGICAL LABORATORY



Dieses Herz eines Zebrabärblings wurde nach einer gezielt herbeigeführten Schädigung mit dem Wirkstoff MSI-1436 behandelt. Das zerstörte Muskelgewebe bildete sich daraufhin rasch neu, und das Organ gewann seine Pumpfähigkeit zurück.

Wundheilungsprozessen beim Großen Tümmler«. Darin wies er darauf hin, dass nicht etwa Narbengewebe die Fleischwunden der Delfine verschließt – dieses lässt sich von normalem Körpergewebe gut unterscheiden –, sondern dass die Meeressäuger das zerfetzte Gewebe tatsächlich neu bilden und so wieder den vorigen Zustand herstellen. Kurz darauf rief Zasloff einen von uns (Kevin Strange) an. Damals Präsident an der gemeinnützigen Wissenschaftseinrichtung MDI Biological Laboratory, unterstützte Strange die Erforschung natürlicher und synthetischer Substanzen, welche die Regeneration von Körpergewebe stimulieren. Zasloff vermutete, einige der antibiotisch wirkenden Substanzen, die er in der Haut von Tieren entdeckt hatte, könnten ebenfalls dazugehören.

In den Jahren seit diesem Telefonat haben Zasloff und wir demonstriert, dass ein natürliches Antibiotikum namens MSI-1436 zu einer dramatisch verbesserten Reparatur beschädigter Organe führt. Das Mittel, ursprünglich aus Dornhaien isoliert, kurbelt die Regeneration verschiedener Gewebe bei Zebrafischen an und fördert bei Mäusen die Neubildung des Herzmuskels. Es scheint molekulare Bremsen zu lösen, die das natürliche Regenerationsvermögen eines Gewebes hemmen. Bei Mäusen mit einer Erkrankung, die der Duchenne-Muskeldystrophie beim Menschen ähnelt (einem angeborenen Muskelschwund), kann MSI-1436 offenbar den fortschreitenden Gewebeverlust verlangsamen. An Menschen haben wir diese Effekte noch nicht demonstriert, doch das natürliche Antibiotikum besitzt einen wichtigen Vorteil gegenüber zahlreichen anderen Arzneistoffkandidaten: Es hat sich in Anwendungen am menschlichen Patienten bereits als sicher erwiesen.

Als getesteter Arzneistoff erwiesenermaßen verträglich

2007 wurde der Stoff an Menschen erprobt – als mögliches Mittel gegen Fettleibigkeit und Typ-2-Diabetes, weil er die Empfindlichkeit der Körperzellen gegenüber Insulin verbessert. Diese Studien, beaufsichtigt von der US-Arzneimittelbehörde FDA, demonstrierten, dass MSI-1436 auch in hohen Dosen gut verträglich ist und den Patienten nicht schadet. Doch da es als Flüssigkeit dargereicht wird und für die medizinische Anwendung täglich gespritzt werden muss, zeichnete sich ab, dass es bei den Patienten nicht sonderlich beliebt sein würde. Denn es gibt alternative Arzneistoffe, die leichter einzunehmen sind, beispielsweise in Form von Tabletten. Pharmaunternehmen haben die Entwicklung von MSI-1436-basierten Medikamenten deshalb nicht weiterverfolgt.

Die Regeneration beschädigter Organe ist freilich ein komplett anderes Anwendungsgebiet, auf dem es derzeit nicht viele medizinische Optionen gibt. Oft sind hier Stammzellen im Gespräch, die im Idealfall sämtliche Zelltypen hervorbringen können, aus denen sich der menschliche Körper zusammensetzt. Theoretisch sind sie dazu in der Lage, Gewebeschäden zu reparieren. Leider jedoch mangelt es Stammzelltherapien auch nach vielen Jahren der Forschung und klinischen Erprobung immer noch an Wirksamkeit und Sicherheit. Ihre einzige breiter etablierte Anwendung ist bislang die Knochenmarktransplantation, um Erkrankungen des Blut bildenden Systems zu behandeln. MS-1436 mit seiner erwiesenen Anwendungssicherheit könnte sich daher als willkommenes neues Instrument der regenerativen Medizin erweisen – etwa um Herzmuskelgewebe wiederherzustellen, das bei einem Infarkt zerstört wurde.

Nicht nur Delfine, auch viele andere Tiere verfügen über erstaunliche regenerative Fähigkeiten. Salamandern wachsen nach dem Verlust eines Körperteils ganze Gliedmaßen nach. Die Neunaugen, aalähnliche Wirbeltiere, können ihr Rückenmark nach einer Durchtrennung wieder zusammenwachsen lassen. Zebrabärblinge, die als Aquarienbewohner beliebt sind und in der biomedizinischen Forschung sehr oft als Versuchstiere dienen, reparieren Schäden an ihren Herzen, Nieren, Bauchspeicheldrüsen und Flossen.

Selbst Menschen haben in dieser Hinsicht einiges zu bieten. Das Regenerationsvermögen unseres Körpers erscheint zwar vergleichsweise wenig beeindruckend, aber zumindest die Haut-, Blut- und Darmzellen erneuern sich ständig. Auch Muskeln wachsen nach kleineren Verletzungen begrenzt nach, ebenso die Leber (letzterer Umstand ist im Prometheus-Mythos verarbeitet). Die menschliche Fähigkeit, Körpergewebe neu zu bilden, geht mit zunehmendem Alter allerdings nach und nach verloren. Das weckte in uns die Hoffnung, sie mit geeigneten molekularen Signalen wieder reaktivieren zu können. Doch dazu mussten wir erst einmal herausfinden, welche Signale das sein könnten. Es lag nahe, bei solchen Tieren danach zu suchen, die über ein hohes Regenerationspotenzial verfügen.

Zasloff war bei seiner Suche nach körpereigenen Antibiotika im Tierreich auf eine Klasse von Molekülen gestoßen, die als Aminosterole bezeichnet werden; MS-1436 gehört dazu. Diese Substanzen können die Regeneration von Körpergewebe fördern, weil sie Aktivitäten wie das Zellwachstum regulieren. Wir beschlossen, ihre Wirkung zunächst an Zebrabärblingen (*Danio rerio*, auch Zebrafische genannt) zu testen. Als Wirbeltiere besitzen diese Fische zum großen Teil die gleichen Organe wie wir, und rund 70 Prozent ihrer Gene haben Entsprechungen im menschlichen Erbgut. Im Embryonalstadium sind sie durchsichtig, was es erleichtert, ihren Körperbau zu untersuchen. Unsere Frage lautete, ob irgendein Aminosterol das Regenerationsvermögen der Tiere verbessert oder beschleunigt.

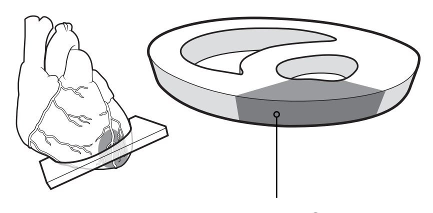
Wir begannen mit einer einfachen Amputation, indem wir den Fischen einen Teil der Schwanzflosse abschnitten und dem Wasser, in dem sie lebten, verschiedene Aminosterole zusetzten. Nichts passierte, und es sah danach aus, als seien wir auf dem Holzweg. Dann jedoch stieß eine neue Mitarbeiterin zu uns – die Highschool-Absolventin Helen Roberts, die ein Praktikum im Labor von Viravuth Yin antrat. Roberts entwickelte eine Methode, um den Zebrafischen die Wirkstoffe zu spritzen, statt diese dem Aquarienwasser zuzufügen. Nachdem sie den Tieren MSI-1436 injiziert hatte, erneuerte sich deren Schwanzflosse dreimal so schnell: Statt zehn bis zwölf Tage dauerte es nun lediglich drei bis vier Tage bis zur vollständigen Regeneration – und das ohne jegliches Anzeichen für eine Fehlbildung.

Wir ließen Roberts und einen Laboranten die Experimente unabhängig voneinander wiederholen. Die beiden teste-

Erneuerte Organe

Die Fähigkeit von Körpergeweben und Organen, sich nach Verletzungen zu regenerieren, ist normalerweise eingeschränkt. Nach einem Herzinfarkt beispielsweise strömen zwar Signalsubstanzen wie Wachstumsfaktoren und Zytokine in das Organ, um die Neubildung von Gewebe anzuregen, doch ein regulatorisches Enzym blockiert sie. Untergegangene Herzmuskelzellen werden somit nicht ersetzt. Bei Nagern ist es nun gelungen, diese Blockade aufzuheben. Als Mäuse mit geschädigtem Herzen den Stoff MSI-1436 gespritzt bekamen, hemmte dieser das regulatorische Enzym, und es bildete sich neues Herzmuskelgewebe, was die Pumpfunktion des Organs wiederherstellte.

Querschnitt durch das Herz



abgestorbenes Gewebe (nach einem Herzinfarkt)

Gehemmte Regeneration

Wachstumsfaktoren und Zytokine

Zellmembran

Phosphatgruppe

RTK

PTP1B

Membran des Zellkerns

DNA

1 Wachstumsfaktoren und Zytokine koppeln an Rezeptor-Tyrosin-Kinasen (RTK); das sind Proteine in der Zellmembran, die Wachstumssignale ins Innere der Zelle übertragen.

2 Ein Enzym mit der Bezeichnung PTP1B hemmt die Rezeptor-Tyrosin-Kinase, indem es Phosphatgruppen von ihr entfernt und sie damit inaktiviert. Signale, die das Zellwachstum und die Zellteilung anregen würden, erreichen somit nicht die DNA im Zellkern.

3 Die Unterbrechung der Signalkette führt dazu, dass abgestorbene Herzmuskelzellen nicht durch neue ersetzt werden. Es bleibt Narbengewebe zurück, das die Herzfunktion beeinträchtigt.

Enthemmte Regeneration

MSI-1436

Signalproteine

DNA

2 MSI-1436 blockiert PTP1B und hält das Enzym davon ab, die Rezeptor-Tyrosin-Kinase zu inaktivieren. Infolgedessen können Wachstumssignale von außen über eine Kette von Signalproteinen bis zur DNA im Zellkern gelangen.

3 Die Signale setzen das Zellwachstum und die Zellteilung in Gang. In den geschädigten Arealen bildet sich neues, gesundes Herzmuskelgewebe und stellt die normale Pumpfunktion des Organs wieder her.

CAMPBELL MEDICAL ILLUSTRATION / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2019

ten verschiedene Substanzen, die sie den Fischen spritzten, und zwar verblindet: Erst nach der Datenauswertung wurde aufgedeckt, um welchen Stoff es sich jeweils gehandelt hatte. MSI-1436 führte in jedem Fall zu einer deutlich verbesserten Regeneration, andere Verbindungen hingegen nicht.

Wie konnte es sein, dass MSI-1436 derart dramatische Effekte zeitigte? Einige Wissenschaftler hatten seine Wirkung schon zuvor in Zellkulturen untersucht, und wir selbst führten weitere Experimente dazu durch. Zusammengenommen belegen diese Versuche, dass der Stoff die so genannte Protein-Tyrosin-Phosphatase 1B (PTP1B) hemmt. Dieses Enzym erfüllt mehrere Funktionen im Organismus, unter anderem reguliert es das Zellwachstum. Das ist eine wichtige Aufgabe, denn unkontrolliertes Wuchern kann zu Fehlfunktionen eines Organs oder zu Krebserkrankungen führen. Im Wesentlichen wirkt PTP1B als Bremse der Geweberegeneration; MSI-1436 schaltet jene Bremse aus.

PTP1B arbeitet mit einer wichtigen Klasse von zellulären Rezeptormolekülen zusammen, den Rezeptor-Tyrosin-Kinasen oder RTKs. Diese sitzen in der Zellmembran und leiten Signale, die Wachstums- und Teilungsprozesse auslösen, aus der Umgebung ins Innere der Zelle weiter. Damit RTKs aktiv werden, müssen sich Phosphatgruppen an sie binden. Hier kommt PTP1B ins Spiel: Es entfernt die Phosphatgruppen, inaktiviert dadurch die RTKs und bremst folglich das Zellwachstum und somit die Regeneration. MSI-1436 wiederum hemmt PTP1B, was die RTKs in Handlungsbereitschaft versetzt und die Regeneration ankurbelt.

MSI-1436 verstärkt die Geweberegeneration sowohl bei Zebrafischen als auch bei Mäusen. Das ist erstaunlich, denn zwischen diesen Spezies liegen rund 450 Millionen Jahre Evolution

Wie wir feststellten, stimuliert MSI-1436 bei den Zebrafischen nicht nur das Nachwachsen der Schwanzflosse, sondern auch das des Herzens. Das ist ein besonders wichtiger Befund im Hinblick auf uns Menschen, denn Schädigungen der Blutpumpe sind ein großes medizinisches Problem. Herz-Kreislauf-Komplikationen stellen weltweit die häufigste Todesursache dar: Jahr für Jahr sterben daran etwa 18 Millionen Menschen. Rund 85 Prozent dieser Todesfälle resultieren aus Herzinfarkten oder Schlaganfällen. Herzmuskelzellen, die bei einem Infarkt untergehen, erneuern sich nicht – sie werden von Narbengewebe ersetzt, das die Gefahr eines weiteren Infarkts erhöht. Seit Jahrzehnten suchen Wissenschaftler nach Therapien, die dem Herzmuskel die Regeneration ermöglichen. Bisher sind alle Ansätze gescheitert, einschließlich der Stammzelltherapie.

Als wir sahen, dass MSI-1436 bei Fischen den Herzmuskel erneuert, gingen wir rasch zu Versuchen an Mäusen über, denn diese Nager dienen als Modellorganismen in der Erforschung von Herzkrankheiten. Wir lösten Herzinfarkte bei den Tieren aus und spritzten ihnen dann vier Wochen lang alle drei Tage MSI-1436. Die Pumpleistung des Organs verbesserte sich auf mehr als das Doppelte, die Menge des Narbengewebes ging um 50 Prozent zurück, und die Herzmuskelzellen an der verletzten Stelle zeigten eine dramatisch gesteigerte Teilungs- und Wachstumsrate. MSI-1436 ist bislang das einzige kleine Molekül, von dem eine solche Wirkung bekannt ist.

Wider den Muskelschwund

Kürzlich begannen wir damit, die Substanz an Mäusen zu testen, die an einer komplett anderen Komplikation leiden: der tierischen Entsprechung zur Duchenne-Muskeldystrophie. Dabei handelt es sich um einen angeborenen, unaufhaltsamen Muskelschwund, der sich sehr stark von dem plötzlich auftretenden Gewebeschaden eines Herzinfarkts unterscheidet. Unsere vorläufigen Daten belegen, dass MSI-1436 die fortschreitende Verkümmerung der Muskulatur zwar nicht stoppt, aber immerhin ihre Symptome lindert.

Der antibiotische Wirkstoff verstärkt die Geweberegeneration sowohl bei Zebrafischen als auch bei ausgewachsenen Mäusen. Das ist durchaus erstaunlich, denn zwischen diesen beiden Spezies liegen rund 450 Millionen Jahre Evolution. MSI-1436 beeinflusst also offenbar zelluläre Prozesse, die evolutionär stark konserviert sind. Dies erhöht die Chance, dass auch der menschliche Organismus in ähnlicher Weise darauf anspricht.

Arzneistoffkandidaten an heterogenen Patientengruppen zu testen, ist freilich eine ganz andere Geschichte als Tierversuche unter stark kontrollierten Laborbedingungen. Obwohl es im Fall von MSI-1436 gute Gründe gibt, optimistisch zu sein, werden wir erst nach entsprechenden Versuchen wissen, ob die Substanz menschlichen Herzinfarktpatienten wirklich hilft. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein potenzieller Wirkstoff in klinischen Studien versagt, ist generell hoch.

Als ersten Schritt in diese Richtung haben wir damit begonnen, MSI-1436 an Schweinen zu testen, die einen Herzinfarkt erlitten haben. Das Herz von Schweinen ist dem menschlichen bemerkenswert ähnlich, und auch die Größe und Physiologie der Tiere kommt der unseren sehr nah, weshalb sich die Ergebnisse entsprechender Versuche viel besser auf den Menschen übertragen lassen als die von Mäuseexperimenten. Sollten die Tests mit Schweinen erfolgreich verlaufen – worauf die bisherigen Ergebnisse hindeuten –, wäre dies eine gute Voraussetzung, um von der FDA die Genehmigung für klinische Studien einzuholen.

In unseren Studien werden wir sorgfältig darauf achten müssen, ob die Behandlung mit MSI-1436 zu einem erhöhten Krebsrisiko führt. In der regenerativen Medizin besteht permanent die Sorge, dass eine forcierte Gewebeneubildung mit ungehemmter Zellproliferation einhergehen könnte – einem zentralen Merkmal von Krebserkrankungen. Vermutlich ist diese Gefahr bei MSI-1436 aber eher als

gering einzuschätzen. Denn die umfangreichen Tests, die das Mittel als möglicher Wirkstoff gegen Diabetes und Fettleibigkeit bereits durchlaufen hat, hätten solche Effekte höchstwahrscheinlich zu Tage gefördert. Es wurde nichts dergleichen gefunden, und die FDA erachtete MSI-1436 als sicher genug, um in Studien mit menschlichen Patienten angewendet zu werden.

Eine verminderte Aktivität des Enzyms PTP1B, wie sie sich nach der Gabe von MSI-1436 einstellt, sollte ebenso wenig mit Risiken behaftet sein. Das Gen, das für dieses Enzym codiert, haben Wissenschaftler schon 1999 in Versuchen an Mäusen ausgeschaltet. Eingehende Untersuchungen der Tiere lieferten keine Hinweise auf ein vermehrtes Tumorwachstum. Selbst das dauerhafte Abschalten von PTP1B verursacht laut diesen Experimenten keine Krebserkrankungen. Eine Behandlung mit MSI-1436, um die Neubildung von Gewebe anzukurbeln, würde dagegen voraussichtlich nur wenige Wochen oder Monate dauern.

Normale Embryonalentwicklung trotz wiederholten Einspritzens des Wirkstoffs

Unsere eigenen Experimente deuten schließlich darauf hin, dass MSI-1436 ausschließlich am Ort einer Verletzung wirkt: In gesundem Gewebe löst es offensichtlich keine überschießende Zellvermehrung aus, die derjenigen eines Tumors gliche. Weder bei Zebrafischen noch bei Mäusen beobachteten wir Wucherungen oder abnormale Strukturen in Körpergeweben beziehungsweise Organen, wenn die Tiere nach Verletzungen mit der Substanz behandelt worden waren. Wir konfrontierten Zebrafischembryonen sogar schon im einzelligen Stadium damit, also in einer hochsensiblen Entwicklungsphase. Embryonen, denen wir 14 Tage lang MSI-1436 injizierten, wuchsen zu normalen Fischen heran. Die Entwicklung von einer einzelnen Zelle hin zum ausgewachsenen Tier ist ein komplexer Vorgang, der eine enorme Zellvermehrung und verwickelte Differenzierungsprozesse erfordert. Zahlreiche Wirkstoffe und Umwelteinflüsse bringen diesen Ablauf durcheinander, wenn sie in einem so frühen Stadium einwirken. Es ist aufschlussreich und beruhigend, dass MSI-1436 dies nicht tut.

Vielleicht vertragen die Tiere die Substanz ja deshalb so gut, weil sie sich ursprünglich in wild lebenden Tieren entwickelt hat: Wissenschaftler haben MSI-1436 weder aus gentechnisch veränderten Labormäusen noch aus Zellkulturen noch in Hochdurchsatz-Screenings der Pharmaforschung isoliert. Unsere ersten Erkenntnisse hinsichtlich dieses Stoffs gewannen wir in Versuchen mit Delfinen, Haien und Zebrafischen. Unser Arbeitsort, das MDI Biological Laboratory, wurde genau für solche Untersuchungen gegründet. Das Institut nahm im Jahr 1898 seine Arbeit als Meeresforschungsstation an der Küste von Maine auf – der Lebensraum, für den sich die Mitarbeiter interessierten, war also nicht weit entfernt.

Die großen biomedizinischen Wissenschaftseinrichtungen und insbesondere die Pharmaindustrie haben heute leider keinen so kurzen Draht mehr zu den Objekten ihrer Forschung. Natürlich ist das computergestützte Moleküldesign mittlerweile unumgänglich, wenn es um die Suche nach neuen Arzneistoffen geht, und enorm wichtig für den Erkenntnisfortschritt. Dennoch machen uns die Worte des Medizinbiologen Alejandro Sánchez Alvarado stolz, der am Stowers Institute for Medical Research (Kansas City) arbeitet und nicht an unseren Studien beteiligt ist: MSI-1436 sei »ein großartiges Beispiel dafür, was passiert, wenn Wissenschaftler etablierte Wege verlassen und die Natur selbst nach Antworten auf schwierige biomedizinische Probleme befragen«. ◂

QUELLEN

King, B.L., Yin, V.P.: Prioritizing studies on regeneration in nontraditional model organisms. Regenerative Medicine 12, 2017

Sánchez, A.A., Yamanaka, S.: Rethinking differentiation: stem cells, regeneration, and plasticity. Cell 157, 2014

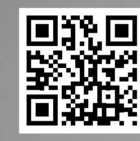
Smith, A.M. et al.: The protein tyrosine phosphatase 1B inhibitor MSI-1436 stimulates regeneration of heart and multiple other tissues. NPJ Regenerative Medicine 2, 2017

Zasloff, M.: Observations on the remarkable (and mysterious) wound-healing process of the bottlenose dolphin. Journal of Investigative Dermatology 131, 2011

WAS IST LOS IN DER WELT DER WISSENSCHAFT?

Die Antwort hören Sie in den **Spektrum**-Podcasts.
Jetzt neu mit ausführlichen Beiträgen unserer Redakteure.

Spektrum.de/podcast



UNSPLASH / BARRETT WARD (https://unsplash.com/photos/0IMpQaXfOCg)

1919



Mit dem Panzer auf Spritztour ins Gebirge.

BESSER ALS DAS AUTOMOBIL

»Der französische Touring Club und die technische Kommission haben sich eingehend mit der Umgestaltung des Tanks in ein Verkehrsmittel beschäftigt. Die Vorzüge dieser im Kriege so gefürchteten Waffe bestanden darin, daß diese mit Hilfe ihrer Radschleifen über die holprigsten Wege zu fahren imstande sind. Diese Anpassungsfähigkeit und die geringen Ansprüche an die Instandhaltung von Straßen und Wegen erleichtern seine Verwendung zu Friedenszwecken. Der Tank bietet dem Automobil gegenüber Vorteile, wenn man berücksichtigt, dass er auf gebahnte Straßen und Wege verzichten kann.« *Die Umschau 43, S. 695*

SCHLAMM STATT KOHLE

»Es ist bekannt, daß die städtischen Abwässer alsbald große Schlammmassen absetzen. Diese werden herausgeschaufelt [und] trocknen gelassen. Es ist verständlich, wenn man sich in Zeiten der Kohlennot mit der Verwertung befasst. Im »Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung« gibt Professor König an, daß sich bis zu 26 cbm Gas aus je 100 kg getrocknetem Klärschlamm gewinnen lassen. Es bleibt ein Koks zurück, der einen Heizwert von 2380 Kalorien hat. Freilich wird Düngemittel der Landwirtschaft entzogen. Denn der Schlamm enthält Stickstoff, Kali, Kalk und Phosphorsalze. Die Vergasung liefert in der Form von Ammoniak einen Teil des Stickstoffes wieder. Die übrigen Düngebestandteile müssen sich in der Asche finden.« *Technische Monatshefte 10, S. 319*

GEFÄHRLICHE SCHÖNHEITS-OPS

»Zwanzig Jahre sind es her, seit der Wiener Arzt Gersuny Einspritzungen eines Paraffingemisches unter die Haut machte. Der Zweck war Schönheitsfehler zu beseitigen, und Gestaltveränderungen an Körperteilen zu bewirken, die dadurch in ihrer Funktion gebessert werden. Trotz langjähriger Ausarbeitung der Methode sind Fälle beschrieben, bei denen das Paraffin nicht einheilte. Eiterungen sah ich bei einer Frau, die sich wegen hängender Brüste Paraffin einspritzen ließ. Kurze Zeit danach traten Schmerzen auf, die Einstichstellen öffneten sich wieder und sonderten Paraffin ab. Bald kam es zu Eiterungen. Es stellten sich Schmerzen in allen Gelenken ein, dazu Sprachstörungen, Gedächtnisschwäche. Nachdem jede andere Behandlung versagt hatte, wurde eine Entfernung beider Brüste vorgenommen, die zu einer völligen Gesundung führte.« *Die Umschau 41, S. 655–656*

1969

STAHLFLASCHEN DURCHLEUCHTET



Schöner messen mit Gammastrahlen.

»Bei diesem Gerät handelt es sich um ein tragbares Messinstrument zur schnellen Ermittlung des Füllstandes von Stahlflaschen mit Flüssigkeitsgas [und] zur Überwachung von Rohrleitungen auf Verstopfung. [Es] arbeitet mit Gammastrahlen nach dem Durchstrahlungsprinzip. Die beiden Schenkel, welche die Strahlungsquelle und das Zählrohr enthalten, umfassen das Messobjekt und werden an ihm entlang bewegt. Die Impulszahl wird an der leeren Stelle des Behälters nur gering herabgesetzt, wo sich das Füllmedium befindet, erfolgt eine stärkere Dämpfung.« *Automatik 10, S. 394*

KÜNSTLICHE NIERE

»Die Neuyorker Columbia-Universität gab die Inbetriebnahme eines Laboratoriums bekannt, das für die Entwicklung künstlicher menschlicher Organe bestimmt ist. Forscher dieses Laboratoriums beschäftigen sich mit der Konstruktion einer künstlichen Niere, die zu Hause ohne ärztliche Hilfe benutzt werden kann. Ziel ist die Konstruktion einer Niere, die so klein ist, dass sie in den Körper eingesetzt werden kann.« *Neuheiten und Erfindungen 393, S. 180*

WINTERSCHLAF IM SOMMER

»Die meisten Tiere, die einen Winterschlaf halten, lassen sich im Sommer [nicht] zu diesem Verhalten zwingen. Doch ist es bei der Laborhaltung vorgekommen, daß ein Erdhörnchen nicht aus dem Winterschlaf erwachte. Man entnahm dem schlafenden Tier Blut und injizierte es drei aktiven Erdhörnchen. Danach wurden sie in abgedunkelte Käfige gebracht, wo die Tiere in den für einen Winterschlaf typischen Zustand fielen.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 10, S. 463*

GESELLSCHAFT BRAUCHT WISSENSCHAFT.
WISSENSCHAFT BRAUCHT GESELLSCHAFT.

DER DIALOG, EIN FORUM, DIE DUZ.

LESEN SIE DAS FACHMEDIUM DES JAHRES 2019 IM PROBEABONNEMENT:

3 AUSGABEN FÜR 15 EURO

SHOP.DUZ-MEDIENHAUS.DE/DM-TESTEN.HTML



MAGAZIN FÜR WISSENSCHAFT UND GESELLSCHAFT

DUZ

FACHMEDIUM DES JAHRES 2019 GEWINNER

// AUSGABE 7.2019

// künstlich //

TARKE ROBOTIK
rienstart: Künstliche Intelligenz – rausforderung für Deutschland

RÜCKWÄRTS NIMMER
Keine Jubelfeiern zu 20 Jahre Bologna, aber es läuft besser als gedacht

„KLARES PROFIL, OFFENE TÜR“
Peter Maassen über das Verhältnis von Hochschule und Gesell

//
unabhängig und dialogorientiert
//



MARTIN JAKOBSSON / SCIENCE PHOTO LIBRARY

ARKTISCHER OZEAN
TEILE ODER HERRSCHE

Jetzt, da das arktische Meereis langsam auftaut, machen fünf Staaten Rechte auf Abschnitte des darunterliegenden Meeresbodens geltend. Die beanspruchten rohstoffhaltigen Gebiete sind riesig – und überlappen sich teils.



Mark Fischetti schreibt als leitender Redakteur bei »Scientific American« zu Themen der Umwelt und Nachhaltigkeit.

⏩ spektrum.de/artikel/1669382

AUF EINEN BLICK
WEM GEHÖRT DER MEERESBODEN?

1. Auf dem Ozeangrund unter dem arktischen Eis lagern Schätzungen zufolge große Mengen an Erdöl und Erdgas. Mit dem Auftauen der Eisdecke werden diese Reservoirs wirtschaftlich interessant.

2. Nach streng vorgegebenen Berechnungsmethoden können Staaten Ansprüche auf Meeresbodenbereiche erheben, die an ihre Küsten grenzen. Ein wissenschaftliches Komitee entscheidet über die Forderungen.

3. Vier der fünf Arktis-Anrainerstaaten haben bereits Anträge eingereicht. Bevor die langwierigen Begutachtungen abgeschlossen sind, könnten Staaten durch politische Aktionen aber bereits Fakten schaffen.

Der Lomonossow-Rücken (helles Band in der Mitte) erstreckt sich quer über den Boden des Arktischen Ozeans. Kanada, Dänemark und Russland fordern Nutzungsrechte an dem Unterseegebirge, das sie als geologische Fortsetzung ihres jeweiligen Festlandsockels ansehen.

MARTIN JAKOBSSON / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Am 2. August 2007 tauchten drei Forscher in einem Mini-U-Boot unter das dicke Eis am Nordpol hinab, fuhren am Meeresboden in 4300 Meter Tiefe einen Roboterarm aus und rammten eine Russlandfahne aus Titan in das dortige Sediment. Zurück an der Oberfläche, erzählte der Expeditionsleiter und Parlamentsabgeordnete Artur Tschilingarow stolz: »Wenn in 100 oder 1000 Jahren jemand dort hinunterfährt, wo wir waren, wird er die russische Flagge sehen.« Präsident Wladimir Putin gratulierte dem Team telefonisch.

Der kanadische Geophysiker David Mosher blieb unbeeindruckt, als er diese Neuigkeiten in seinem Büro am Bedford Institute of Oceanography in Nova Scotia (Neuschottland) vernahm. Er schaut auf einen kleinen Zylinder aus getrocknetem, verdichtetem Schlamm in Form einer Bratwurst. Dabei handelt es sich um ein kurzes Stück eines 13 Meter langen Sedimentkerns, der aus ebenjenem Meeresboden am Nordpol entnommen wurde – 1991, als der damalige Doktorand Mosher gemeinsam mit 40 Wissenschaftlern aus verschiedenen Ländern auf zwei Forschungseisbrechern aus Deutschland und Schweden unterwegs gewesen war und sie die Probe gezogen hatten. »Wir schufen das Loch, damit die Russen ihre Flagge aufstellen konnten«, witzelt Mosher.

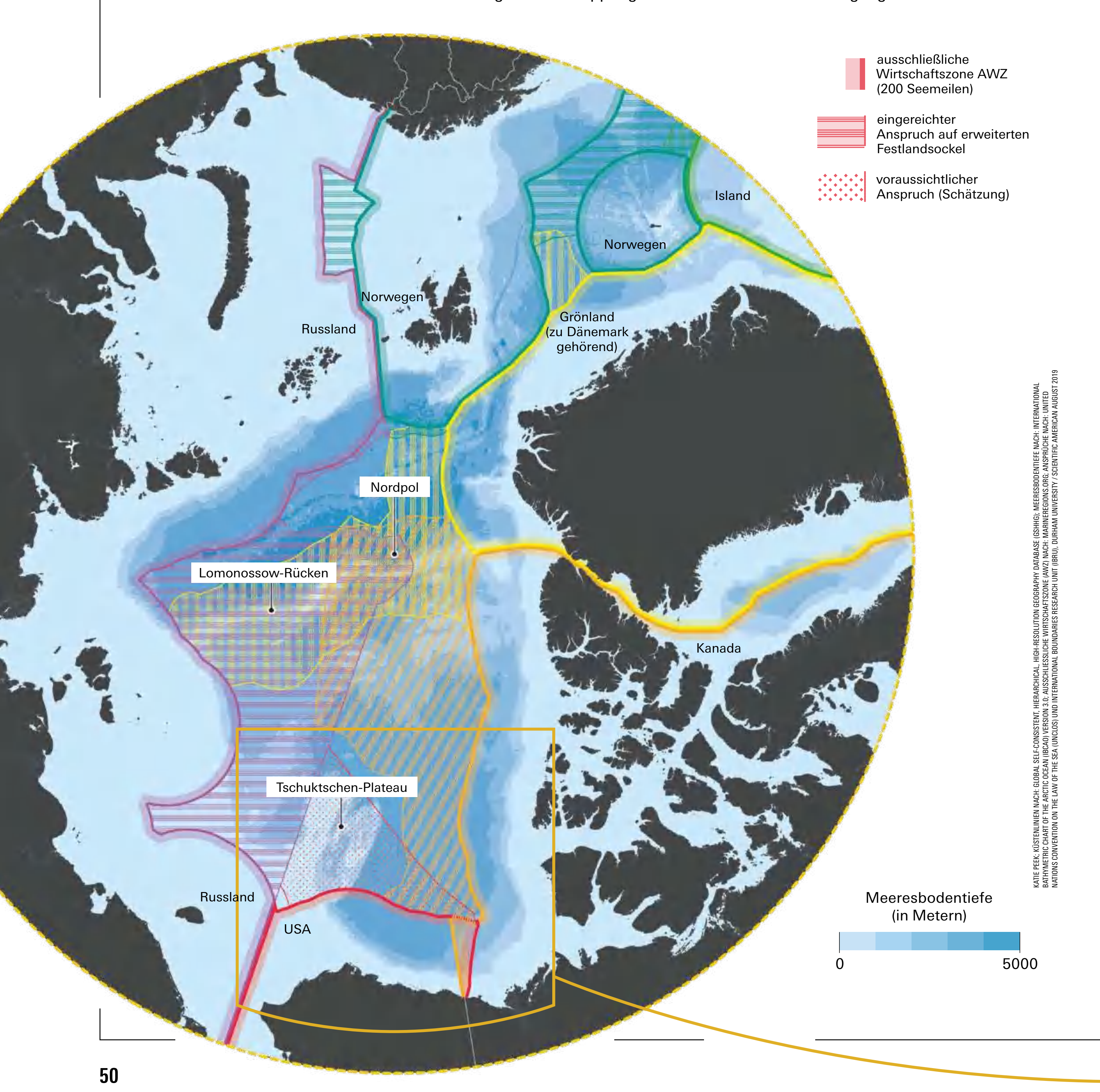
Deren politische Aktion sollte die Moral in Russland heben, das gerade eine tiefe Rezession durchlitt. Der unverblümte Anspruch auf den Nordpol signalisierte den anderen vier Anrainerstaaten des Arktischen Meeres allerdings, dass es höchste Zeit wurde, formal ihre Rechte am Meeresboden der Arktis einzufordern.

Bis vor einiger Zeit galt der nördlichste aller Ozeane als eher nutzloser Eispanzer. Doch dann begann dieser zu schmelzen, und es eröffneten sich ganz neue wirtschaftliche Möglichkeiten. Einer Studie des United States Geological Survey von 2008 zufolge verbergen sich in den mächtigen Sedimenten unter dem Nordpolarmeer 30 Prozent des weltweit noch zu entdeckenden Erdgases und 13 Prozent des Erdöls. Auch wertvolle Eisenminerale und Seltene Erden könnten dort zu finden sein. Wenn sich das arktische Meereis zurückzieht, ließen sich außerdem alternative, kürzere Schifffahrtswege eröffnen. Angesichts dieser rosigen Zukunftsaussichten möchte sich jedes der fünf angrenzenden Länder so viel Territorium wie möglich sichern.

Norwegen als eines von ihnen hat der UN-Festlandsockelgrenzkommission (FSGK) bereits 2006 geologische Daten und Karten für drei beanspruchte Meeresbodenbereiche vorgelegt. Die Kommission prüft solche Anwartschaften und befindet darüber, ob sie wissenschaftlich exakt begründet wurden. Dänemark, zu dem Grönland gehört, machte 2014 basierend auf einer riesigen Datenmenge Rechte auf einen 900 000 Quadratkilometer großen

Grenzen ziehen

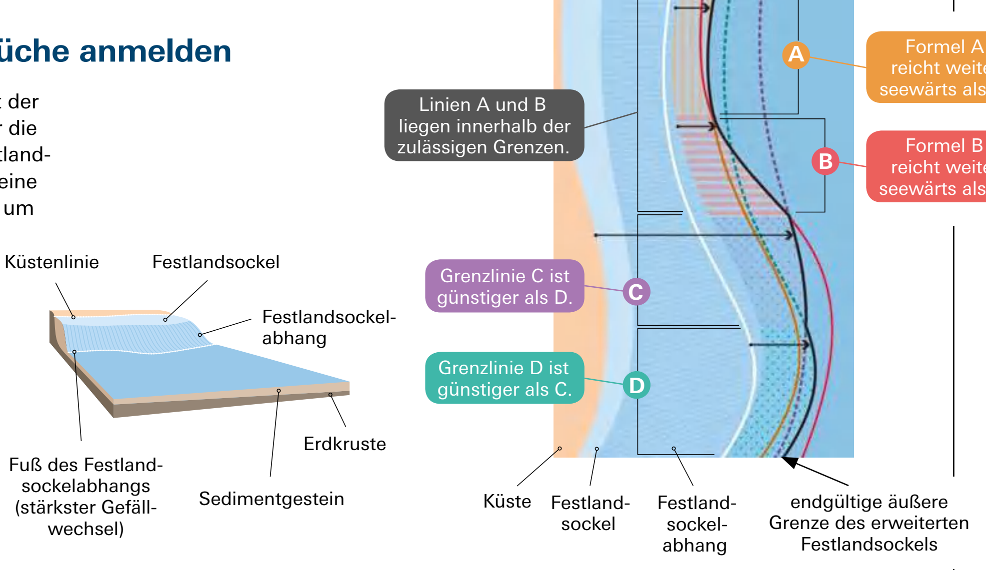
Die fünf Staaten mit Küsten am Arktischen Ozean beanspruchen vor der UN-Festlandsockelgrenzkommission (FSGK) einen »erweiterten Festlandsockel« am Meeresboden jenseits ihrer ausschließlichen Wirtschaftszonen. So wollen sie sich die Rechte auf Bodenschätze am und unter dem Meeresgrund sichern. Der Ozean selbst bliebe entsprechend dem Seerecht internationales Gewässer. Die Arktisstaaten werden große Überlappungen ihrer Gebietsansprüche klären müssen, speziell rund um den Nordpol und am Lomonossow-Rücken. Nur ein oder zwei kleine Bereiche des Meeresbodens werden vermutlich für den Rest der Welt frei zugänglich bleiben.



KATIE PEEK; KÜSTENLINIEN NACH: GLOBAL SELF-CONSISTENT, HIERARCHICAL, HIGH-RESOLUTION GEOGRAPHY DATABASE (GSHHG); MEERESBODENTIEFE NACH: INTERNATIONAL BATHYMETRIC CHART OF THE ARCTIC OCEAN (IBCAO) VERSION 3.0; AUSSCHLIESSLICHE WIRTSCHAFTSZONE (AWZ) NACH: MARINEREGIONS.ORG; ANSPRÜCHE NACH: UNITED NATIONS CONVENTION ON THE LAW OF THE SEA (UNCLOS) UND INTERNATIONAL BOUNDARIES RESEARCH UNIT (IBRU), DURHAM UNIVERSITY / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2019

Wie Länder ihre Ansprüche anmelden

Der jeweilige Küstenstaat übermittelt der Kommission Dokumente, in denen er die äußere Kante seines erweiterten Festlandsockels umreißt. Dazu verwendet er eine von zwei erlaubten Methoden (A, B), um seine Grenze so weit wie möglich nach außen zu verschieben, ausgehend vom Fuß des Festlandsockelabhangs. Die maximale Ausdehnung wird durch eine von zwei möglichen Außengrenzen (C, D) beschränkt, wobei der Staat die für ihn günstigere Linie heranziehen darf.



Formeln zur Bestimmung der äußeren Grenze:



A eine 60 Seemeilen vom Fuß des Festlandsockelabhangs entfernte Linie

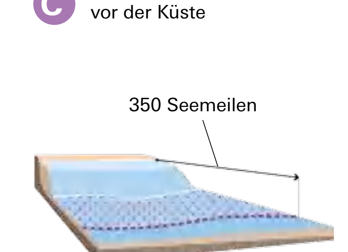
B eine Linie, an der die Dicke des Sedimentgesteins mindestens ein Prozent der kürzesten Distanz vom Fuß des Festlandsockelabhangs beträgt



Beschränkung der Außengrenzen

C 350 Seemeilen vor der Küste

D 100 Seemeilen seewärts der 2500-Meter-Wassertiefenlinie



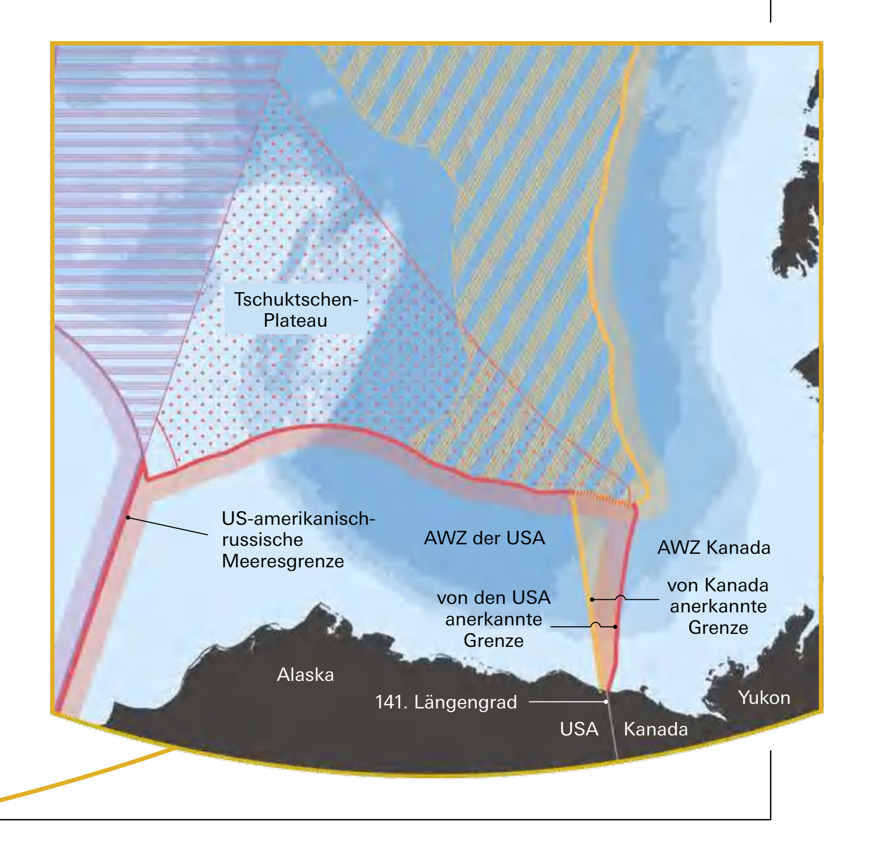
KATIE PEEK; KÜSTENLINIEN NACH: GLOBAL SELF-CONSISTENT, HIERARCHICAL, HIGH-RESOLUTION GEOGRAPHY DATABASE (GSHHG); MEERESBODENTIEFE NACH: INTERNATIONAL BATHYMETRIC CHART OF THE ARCTIC OCEAN (IBCAO) VERSION 3.0; AUSSCHLIESSLICHE WIRTSCHAFTSZONE (AWZ) NACH: MARINEREGIONS.ORG; ANSPRÜCHE NACH: UNITED NATIONS CONVENTION ON THE LAW OF THE SEA (UNCLOS) UND INTERNATIONAL BOUNDARIES RESEARCH UNIT (IBRU), DURHAM UNIVERSITY / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2019

Reine Verhandlungssache

Im Streit um Ansprüche auf den Meeresboden sind politische und wissenschaftliche Argumente abzuwägen.

Ein anpassungsfähiges Plateau
Russland und die USA könnten das Tschuktschen-Plateau zu einer »natürlichen Verlängerung« ihres Festlandsockels erklären, je nachdem wie Experten die Vorgänge beim Auseinanderdriften der Kontinente über Jahrmillionen hinweg interpretieren. 1990 haben die damalige Sowjetunion und die USA jedoch eine Seegrenze zwischen ihren ausschließlichen Wirtschaftszonen (AWZ) ausgehandelt. Russland hat diese Grenze in seiner Eingabe für einen erweiterten Festlandsockel nicht überschritten, sondern lediglich nordwärts verlängert. Auch die USA wollen die Grenze respektieren.

Wirtschaftliche Pattsituation
Die USA und Kanada sind sich über ihre AWZ-Grenze uneinig. Kanada verlängert die am 141. Längengrad verlaufende Landesgrenze seewärts (orangefarbene Linie). Die USA ziehen hingegen eine abstandsgleiche Linie zur gewundenen Küstenlinie (rot). In dem dreieckigen Stück Meeresboden dazwischen schlummern geschätzte 1,7 Milliarden Kubikmeter Erdgas.



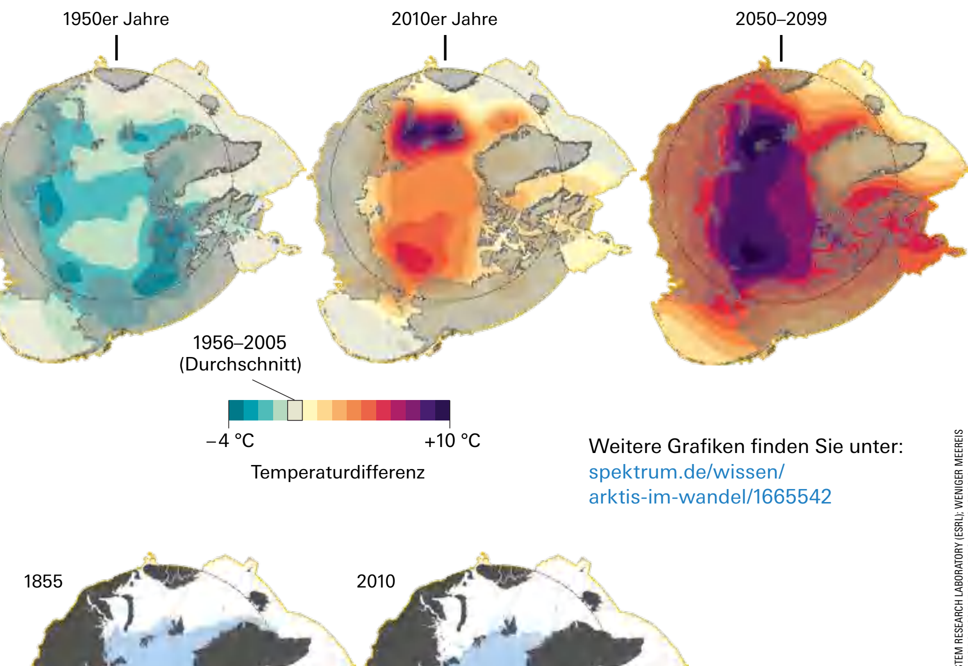
Abschnitt des arktischen Ozeangrunds geltend. Ein Jahr später reichte Russland seine Unterlagen zu einer Forderung über 1,3 Millionen Quadratkilometer des Unterseebodens ein, eine Fläche mehr als dreieinhalbmal so groß wie Deutschland, die sich mit über der Hälfte des von Dänemark beanspruchten Gebiets überschnitt. Ein kanadisches Team unter Führung Moshers übergab im Mai 2019 schließlich 2100 Seiten Text, Koordinaten und Messungen von Fächersonaren und Gravimetern sowie Bohrkernproben an die Kommission und forderte 1,1 Millionen Quadratkilometer Fläche unter dem Nordpolarmeer für Kanada, wobei sich diese in hohem Maß mit den von Russland und Dänemark beanspruchten Meereszonen überschneidet. Fünfter im Bunde sind die Vereinigten Staaten, die ihre Daten nicht vor 2022 vorlegen wollen. Voraussichtlich wird ihr Claim mit demjenigen von Kanada überlappen.

Jahrhundertelang galten die Ozeane als Niemandsland. Erst im 17. Jahrhundert begannen sich die Meeresanrainerstaaten Rechte über die Drei-Meilen-Zone zu sichern, einen drei Seemeilen (5,56 Kilometer) breiten Streifen des Küstenmeeres. Als verschiedene Länder ihre Hoheitsgewässer im späten 20. Jahrhundert weiter ausdehnten, geriet das Gewohnheitsrecht der Freiheit der hohen See in Gefahr. Daher führte schließlich 1982 das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (SRÜ), dem mehr als 160 Länder beitraten, eine ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) ein, die von der Küste 200 Seemeilen (370,4 Kilometer) weit hinausreicht. Innerhalb dieses Gebiets verfügt der jeweilige angrenzende Küstenstaat über die natürlichen Ressourcen im und unter dem Wasser, während Bereiche außerhalb der Zone als internationale Gewässer für alle frei zugänglich bleiben.

Eine Region im Wandel

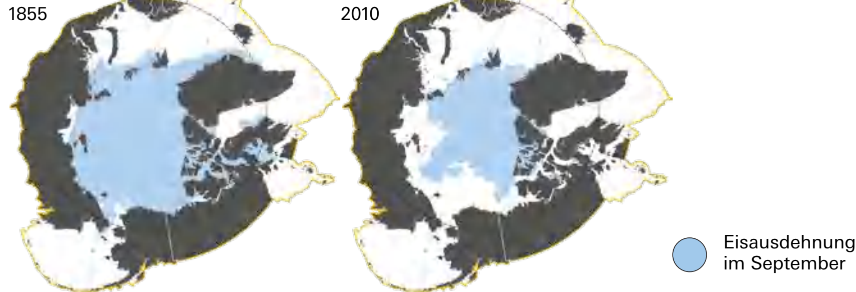
Landschaft und Gewässer der Arktis verändern sich so dramatisch, dass Forschende kaum noch Worte dafür finden. Physikalische Faktoren wie steigende Luft- und Wassertemperaturen beschleunigen diese Entwicklung ebenso wie der Rückgang von Schnee und Meereis. Die dort ansässigen Lebewesen – von Algen über Bäume bis hin zu Rentieren – reagieren sehr unterschiedlich: Manche gedeihen sehr gut, einige migrieren, für andere wiederum wird es kritisch. Nahezu die gesamte Nahrungskette muss sich neu einpendeln. Besonders gravierend könnte sich das Auftauen des Permafrostbodens auswirken. Das könnte so große Mengen an Treibhausgasen freisetzen, dass sich die Region sowie die gesamte Erde doppelt so schnell erwärmen dürften wie derzeit.

Luft und Ozean heizen sich auf
Die durchschnittlichen winterlichen Lufttemperaturen an der Oberfläche lagen in den 2010er Jahren viel höher als in den 1950er Jahren. Für die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts sagen Klimaforscher eine weitere deutliche Temperatursteigerung voraus. Auch die Sommertemperaturen an der Meeresoberfläche haben merklich zugenommen und werden Prognosen zufolge weiter steigen.



Weitere Grafiken finden Sie unter: spektrum.de/wissen/arktis-im-wandel/1665542

Das Meereis schrumpft drastisch
Jedes Jahr im September erreicht das Meereis in der Arktis seine geringste Ausdehnung. Jetzt schrumpft es von Jahr zu Jahr stärker. Als Referenzjahr für den Zeitraum 1850 bis 1859 dient 1855, die Abbildung basiert auf Karten sowie Aufzeichnungen von Seefahrern und Forschern. 2010 ist das Referenzjahr für die jüngste Dekade. Daneben hat auch die Zahl der Wochen mit Schneebedeckung im Winter von 1972/73 bis 2008/09 deutlich abgenommen.



KATIE PEEK; HEISSERE LUFT NACH: NOAA EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY (ESRL); WENIGER MEEREIS NACH: U.S. NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER (NSIDC) / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2019

Die Konvention ließ jedoch eine Hintertür offen: Laut Artikel 76 darf ein Staat den Ozeanboden außerhalb seiner 200-Meilen-Zone nutzen, falls er geologisch schlüssig nachweisen kann, dass sein Festlandsockel – der Teil des Meeresgrunds, der von der Küste bis weit in den Ozean hinein sanft absteigt, bevor er plötzlich steil zur Tiefsee abfällt – über diese Zone hinausragt. Auf dem Festlandsockel hätte ein Staat ausschließliche Rechte über die Ressourcen auf und unter dem Meeresboden, nicht aber in der Wasser- oder Luftsäule darüber. Fischfang und Navigation blieben also frei. Seit das arktische Eis schrumpft, interessieren sich die Anrainerstaaten des Nordpolarmeeres zunehmend für die spezielle Klausel.

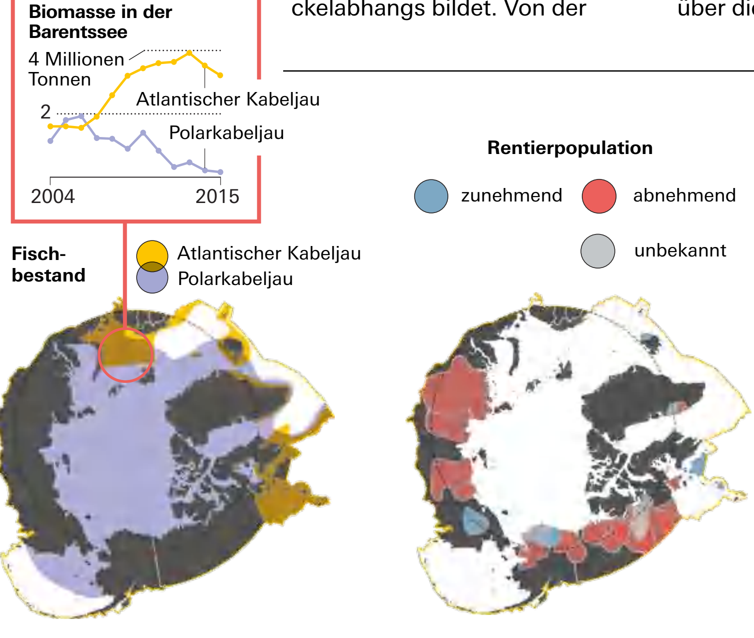
Alles dreht sich um den Fuß des Festlandabhangs

Artikel 76 regelt auch, wie im Fall einer Erweiterung der äußere Rand des Festlandsockels zu bestimmen ist. Er beschreibt zwei alternative Methoden, um die Grenze in Anlehnung an die geologischen Gegebenheiten zu ziehen: die Sedimentdicken-Formel und die Distanz-Formel (siehe »Wie Länder ihre Ansprüche anmelden«, S. 51). Außerdem setzt er Maximalentfernungen fest, gerechnet von der Küste oder von der 2500-Meter-Wassertiefenlinie, damit ein Staat nicht einen unverhältnismäßig großen Teil eines Ozeans für sich beanspruchen kann.

Die beiden Formeln für die Bestimmung der äußeren Grenzen basieren auf der Linie, die der Fuß des Festlandsockelabhangs bildet. Von der Küste aus sinkt der Meeresboden über viele Kilometer hinweg ganz allmählich ab, bevor er schließlich steil auf ungleich größere Tiefen unter dem zentralen Ozean abfällt. An der zunächst zu definierenden Basis dieses steilen Abhangs müssen die Wissenschaftler des jeweiligen Landes die Linie des stärksten Gefällwechsels ermitteln, sowohl vor den Küsten als auch rund um eventuelle Inseln. Den Fuß des Festlandsockelabhangs zu bestimmen, sei »die Hauptaufgabe der Wissenschaftler«, sagt Mosher.

Die Arktis-Anrainerstaaten, auch »Arktische Fünf« genannt, säumen das fast kreisrunde Nordpolarmeer. Wenn sie ihre Festlandsockel entsprechend den Formeln vom Rand des Meeres bis zu dessen Zentrum projizieren, überlappen sich die Abschnitte zwangsläufig. Viel problematischer ist aber eine weitere Bestimmung des Artikels 76: Laut ihr kann ein Land einen breiten Streifen des Ozeangrunds an einem unterseeischen Rücken in der Verlängerung des Festlandsockels für sich postulieren, unabhängig davon, wie weit dieser reicht. Der Artikel definiert allerdings nicht, was unter einem Rücken zu verstehen ist. Die Formulierung »ist vollkommen unklar«, meint Larry Mayer, Direktor des Zentrums für Küsten- und Meereskartografie der University of New Hampshire. Mayer, früher Professor an der Dalhousie University und Moshers Doktorvater, gilt in den USA als führende Autorität in Sachen arktischer Meeresboden.

Die Mehrdeutigkeit des Artikels gibt den Geologen und auch den Juristen in den Außenministerien der beteiligten Länder einigen Spielraum für die Interpretation der Daten über die Ozeanrücken. Am stärksten überlappen die An-



Fische migrieren
Der Polarkabeljau benötigt Meereis, um abzulaichen. Mit der Erwärmung der Ozeane schrumpft seine Population; gleichzeitig wandert der Atlantische Kabeljau von Süden her ein.

Rentiere geraten in die Defensive
Während Vögel wie die Dickschnabellummen, die an der Küste nisten, umziehen, sieht es für andere Tiere schlechter aus. Rentierpopulationen verlieren vielerorts an Bestand. Von 23 beobachteten Herden schrumpfen 16 derzeit, fünf wachsen, zwei sind konstant. Eisbären wiederum verschwinden an breiter Front.

KATIE PEEK; BIOMASSE NACH: STATE OF THE ARCTIC MARINE BIODIVERSITY REPORT, CHAPTER 3.4 MARINE FISHES. CONSERVATION OF ARCTIC FLORA AND FAUNA (CAFF); FISCHMIGRATION NACH: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO); RENTIERHERDEN NACH: ARCTIC BIODIVERSITY ASSESSMENT 2013. CONSERVATION OF ARCTIC FLORA AND FAUNA (CAFF) UND ARCTIC COUNCIL 2013 / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2019

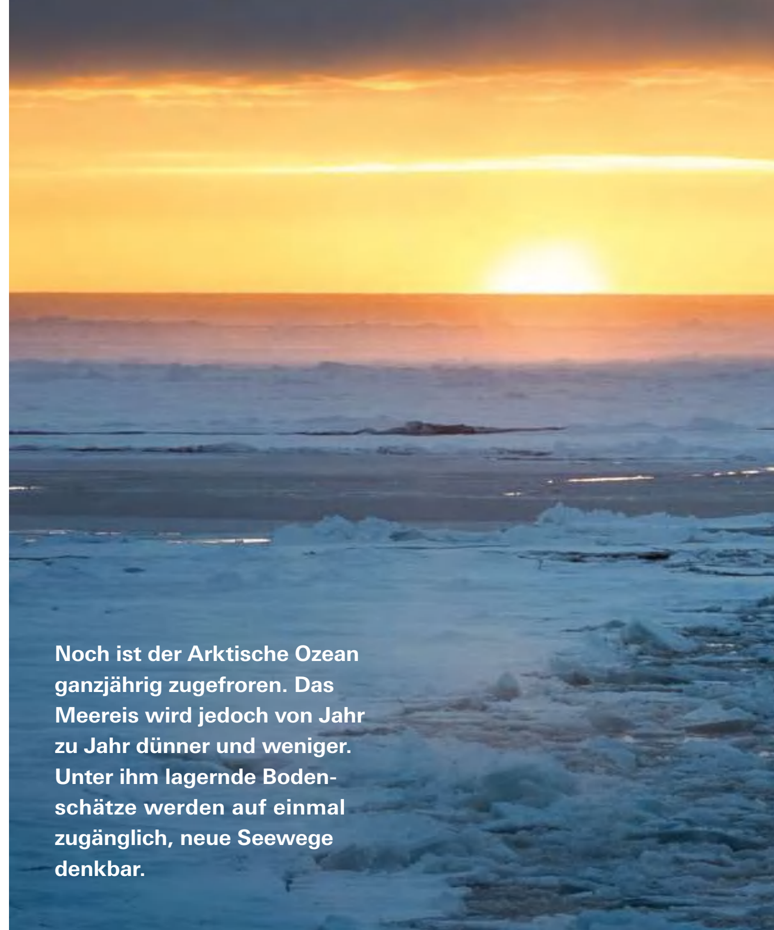


GETTY IMAGES / GALLO IMAGES / MORGAN TRIMBLE

Biber breiten sich aus – mit fataler Wirkung
Bäume gedeihen auf Grund der Erwärmung nördlicher als zuvor. Damit siedeln sich dort auch Biber an und fällen die Gehölze, um Dämme zu bauen und Gewässer aufzustauen. Durch diese örtlich begrenzten Überflutungen taut Permafrostboden auf und setzt Kohlenstoffdioxid und Methan frei. Diese Treibhausgase verstärken die Erwärmung, woraufhin sich der Baumbewuchs wiederum weiter nach Norden ausbreitet und noch mehr Biber nachziehen. So setzt sich der Kreislauf fort, und der Temperaturanstieg schreitet voran.

sprüche Dänemarks, Russlands und Kanadas am Lomonossow-Rücken (Bild S. 48/49). Er zieht sich auf einer Länge von 1800 Kilometern von den zu Russland zählenden Neusibirischen Inseln bis zur kanadischen Ellesmere-Insel nahe Grönland mitten durch den Arktischen Ozean. Manche seiner Erhebungen ragen 3500 Meter über dem Tiefseegrund auf. Bei diesem Rücken handelt es sich um ein gigantisches Relikt aus einer Jahrmillionen zurückliegenden Epoche, als Nordamerika und Eurasien begannen, sich durch Kontinentaldrift voneinander zu entfernen, wobei der sich spreizende arktische Meeresboden verzogen und verbogen wurde. Auf Grund der räumlichen Nähe stellt sich die Frage, ob Dänemark (zu dem Grönland gehört), Russland oder Kanada den Lomonossow-Rücken als natürliche Erweiterung ihres jeweiligen Festlandsockels für sich reklamieren können. Markantester Punkt in diesem strittigen Gebiet ist der Nordpol.

Im Idealfall richten sich die Wissenschaftler bei der Kartierung der zu beanspruchenden Gebiete nach den geologischen Gegebenheiten. Allerdings können die für die Eingabe bei der UN-Kommission zuständigen Stellen die Forschungsergebnisse auch entsprechend politischen Erwägungen nutzen. Russland hätte eine Erweiterung seines Festlandsockels entlang des Lomonossow-Rückens über den zentralen Arktischen Ozean hinweg bis zu Kanadas 200-Meilen-Zone verlangen können. Aber es fordert in seiner Eingabe an die FSGK nur den Abschnitt bis unmittelbar über den Nordpol hinaus. Eine Erklärung gaben die Russen dazu nicht ab. Laut Experten könnte das finanzielle oder taktische Gründe haben.



Noch ist der Arktische Ozean ganzjährig zugefroren. Das Meereis wird jedoch von Jahr zu Jahr dünner und weniger. Unter ihm lagernde Bodenschätze werden auf einmal zugänglich, neue Seewege denkbar.

ALFRED-WEGENER-INSTITUT, STEFAN HENDRICKS (MULTIMEDIA.AWI.DE/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

Wem gehört der Lomonossow-Rücken?

Kanada hat sich für eine ähnliche Herangehensweise entschieden und den Lomonossow-Rücken von seiner Küste aus bis unmittelbar jenseits des Nordpols abgesteckt, womit sich am Pol eine Überlappung mit der von Russland ausgewiesenen Fläche ergibt. Dänemark hingegen reklamiert den Rücken von Grönland über den gesamten Ozean hinweg bis zur russischen 200-Meilen-Zone für sich.

Angesichts der Unbestimmtheit von Artikel 76 könnten alle drei Erklärungen zum Lomonossow-Rücken aus wissenschaftlicher Sicht zulässig sein. Doch letztlich ist es nicht Sache der Forschung, welcher Staat sich Rechte auf welches Territorium sichert, sondern der Diplomatie oder unter Umständen sogar des Militärs. Und zunehmende geopolitische Spannungen könnten den geordneten, wissenschaftsbasierten Prozess überrollen.

Vor allem sind kompliziertere Verhandlungen zu erwarten, sobald die USA ihre Eingabe an die FSGK eingereicht haben. Das Land befindet sich möglicherweise jedoch in der schwächsten Verhandlungsposition, da es dem SRÜ im Gegensatz zum Rest der Arktischen Fünf nie beigetreten ist.

Die Sichtung der Daten bei der 21-köpfigen Festlandsockelgrenzkommission könnte lange dauern. Es geht auch deshalb bedächtig voran, weil über 80 Streitigkeiten um den Ozeanboden zu klären sind – unter Ländern aller Welt, von Nicaragua über Ghana bis Vietnam. Mit der Interpretation der dänischen und russischen Daten wird frühestens in einigen Jahren gerechnet, die Ansprüche Kanadas werden nochmals um einiges später bearbeitet sein. Da die Kommission auch kein Urteil über sich überlappende Claims spricht, müssen die beteiligten Staaten nach Abschluss aller Bewertungen diplomatische Verfahren einleiten, ihre Empfehlungen seitens der FSGK auf den Tisch legen und Abgrenzungsübereinkünfte abschließen. Auch dieser Schritt könnte viel Zeit benötigen.

Die Kartierung und die Eingabe der Ansprüche verliefen bisher friedlich, wenn nicht gar kooperativ, wobei die geologischen Gegebenheiten im Vordergrund standen. Doch das gemächliche Tempo des gesamten Prozesses wird allmählich zum Problem. Während sich die Wissenschaftler methodisch durch die Claims der jeweiligen Länder arbeiten, erhöhen die Arktis-Anrainerstaaten ihre Militärpräsenz im hohen Norden. Die USA, die der Region bislang wenig Aufmerksamkeit geschenkt hatten, erwarten laut einer Erklärung des Verteidigungsministeriums nun eine »Ära strategischen Wettbewerbs«. Erstmals seit seiner Gründung vor 23 Jahren endete eine Zusammenkunft des Arktischen Rats im Mai 2019 ohne eine gemeinsame Schlusserklärung der teilnehmenden Länder. Diese Missstimmigkeiten könnten Grenzverhandlungen verkomplizieren, wobei die gegnerischen Seiten die wissenschaftlichen Erkenntnisse übergehen könnten, statt einen Kompromiss zu suchen.

Während einige Fachleute das Risiko sehen, dass sich die Lage um den nördlichsten Punkt der Erde zuspitzt, halten andere das Potenzial für Konfrontationen für übertrieben. »Die Leute glauben, in der Arktis fände ein Wettbewerb statt«, sagt Heather Exner-Pirot, wissenschaftliche Mitarbeiterin am Zentrum für universitätsübergreifende Forschung zu den internationalen Beziehungen von Kanada



ALFRED-WEGENER-INSTITUT, STEFAN HENDRICKS (MULTIMEDIA.AWI.DE/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

und Quebec und Redaktionsleiterin beim »Arctic Yearbook«, einem Onlinejahrbuch, das den Stand der Arktispolitik analysiert. »Stattdessen gibt es vielmehr ein Oligopol von fünf Staaten, die sich freuen, dass sie gemeinsam das Monopol auf den Arktischen Ozean besitzen.«

China oder Grönland könnten das Arrangement der Arktischen Fünf durcheinanderbringen

Die Arktischen Fünf schrieben diesen Zustand 2008 fest, indem sie in der so genannten Ilulissat-Erklärung artikulierten, künftig gemeinsam den Schiffsverkehr sicherstellen, Ölkatastrophen vorbeugen und Meinungsverschiedenheiten friedlich beilegen zu wollen. Weiter würden sie jeden größeren internationalen Regulierungsversuch in der Arktis blockieren und jedwedes Drittland daran hindern, ohne ihre Genehmigung nach Öl oder Gas zu bohren. Weitere Staaten waren an dem Abkommen ebenso wenig beteiligt wie die indigene Bevölkerung der Arktis.

Falls Streitigkeiten zwischen den Mitgliedern der Arktischen Fünf eine geordnete Lösung der Ansprüche auf den Meeresboden nicht gefährden, könnten dies allerdings zwei andere Faktoren tun. Dazu zählen zum einen Chinas wirtschaftliche Ambitionen. 2013 gab Staatspräsident Xi Jinping die Initiative »Neue Seidenstraße« bekannt mit dem Ziel, einen Wirtschaftsverbund zwischen zahlreichen Ländern zu schaffen. Mit einem Teil des Vorhabens namens »Polare Seidenstraße« möchte das Land Schifffahrtslinien über den Arktischen Ozean und Geschäfte mit den von diesen Routen berührten Ländern aufbauen.

Die zweite Unbekannte ist Grönland, das seit 1953 zu Dänemark gehört, sich seit 2009 aber weitgehend selbst verwaltet und auf absehbare Zeit die Unabhängigkeit anstrebt. China, die USA und weitere Länder investieren stark in den Bergbau der weltgrößten Insel, wodurch diese finanziell selbstständiger wird. Einmal rechtlich unabhängig, könnte sie der NATO beitreten oder eine Partnerschaft mit China oder Russland eingehen, um die Regionen zu erschließen, von denen sich das Eis zurückzieht. Dänemark hat Grönland bereits die Rechte auf Bodenschätze am Meeresgrund innerhalb der 200-Meilen-Zone rund um die Insel übertragen; falls das Land einem souveränen Grönland auch die Ansprüche auf riesige Gebiete am Festlandsockel überließe, müsste eine grönländische Regierung eventuell neue Verhandlungen über den Festlandsockel führen, was das Prozedere möglicherweise weiter verzögern würde.

Zwar möchten führende Wissenschaftler der Arktischen Fünf sich nicht ausführlich zu künftigen Grenzverhandlungen wegen der Überlappungen äußern. Doch geht einigen das Verfahren bei der FSGK zu langsam voran. Neun Forscher aus Kanada, den USA, Dänemark und Russland arbeiten daran, gemeinsam die Basis des Festlandsockelabhangs für den gesamten Arktischen Ozean zu definieren und die Ergebnisse in einer Fachzeitschrift zu veröffentlichen. Innerhalb dieser Basis bestimmen die Länder anschließend den Punkt des größten Gefällwechsels, den Fuß des Festlandsockelabhangs. Mit einer einheitlichen Definition würden die beteiligten Staaten daher das Signal aussenden, dass sie ihre Berechnungen auf derselben Grundlage anstellen. Vielleicht könnte diese Harmonisierung die Überprüfung durch die FSGK beschleunigen.

Sollte die Kommission die Eingaben der Arktischen Fünf praktisch unverändert durchwinken, bliebe nur ein vergleichsweise kleiner Teil der arktischen Meeresregion rechtlich keinem Staat zugeordnet. Dieser unbeanspruchte Bereich, das so genannte Gebiet (The Area), würde sich aller Voraussicht nach auf zwei bescheidene Flächen weit draußen auf See beschränken (siehe »Grenzen ziehen«, S. 50). Der Rest der Welt dürfte mit diesem Ergebnis nicht einverstanden sein.

Oft ist zu hören, der Arktische Ozean sollte formal zum gemeinsamen Erbe der Menschheit erklärt werden, nach dem Vorbild des Antarktis-Vertrags. In Kraft seit 1961, deklariert dieser das gesamte Land und die Eisschelfe als wissenschaftliches Schutzgebiet, verbietet militärische Aktivitäten und schützt außerdem mehr als 20 Millionen Quadratkilometer des Südpolarmeeres rund um den antarktischen Kontinent. Doch die Antarktis ist unbewohnt, abgelegener und stärker vereist, und es grenzen keine Staaten mit ihren Küsten an sie. Über dortige Bodenschätze ist wenig bekannt, die strategische Bedeutung gilt als eher gering. Wenn das arktische Eis hingegen den nördlichen Ozean frei gibt, ist es keine Frage, ob dieser aufgeteilt wird – die Frage lautet vielmehr, ob die Wissenschaft oder die Politik über sein Schicksal bestimmt. ◂

QUELLEN

Gautier, D.L. et al.: Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic. Science 324, 2009

United Nations Convention on the Law of the Sea: CLCS/40/Rev.1 – Rules of procedure of the commission on the limits of the continental shelf

INTERVIEW

DIE VERMESSUNG DER ARKTIS

Am 20. September startet eine einzigartige Expedition: Ein Jahr lang wird das Forschungsschiff »Polarstern«, im Eis eingefroren, über den Nordpol driften. Expeditionsleiter Markus Rex erläutert, auf welche Erkenntnisse er hofft.

⏩ spektrum.de/artikel/1669384

ALFRED-WEGENER-INSTITUT / MARIO HOPPMANN (MULTIMEDIA.AWI.DE) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)



Ein Jahr lang wird der Forschungseisbrecher »Polarstern« eingefroren im Eis durch die Arktis driften. Die einmalige Expedition soll helfen, grundlegende Prozesse in der Region zu verstehen und Klimasimulationen weiter zu verbessern.

Herr Professor Rex, Sie starten zu einer ganz besonderen Expedition: In einem Eisbrecher lassen Sie sich mit der Transpolardrift von Sibirien über den Nordpol bis nach Grönland treiben. Wie kann man sich das konkret vorstellen?
Wir wollen zum ersten Mal ganzjährig mit einem modernen Eisbrecher Forschung in der Zentralarktis betreiben: jenseits von 80 Grad Nord, lange auch in direkter Umgebung des Nordpols. Da das Eis im Winter zu dick ist, kommen wir zu dieser Jahreszeit auch mit den besten Forschungseisbrechern nicht an diese Orte. Daher starten wir bereits am 20. September in Tromsø, fahren dann im offenen Wasser entlang der sibirischen Küste, bis wir auf etwa 130 Grad Ost Kurs nach Norden aufnehmen. Dort brechen wir durch das im Sommer recht dünne Meereis durch. Mit unserem deutschen Forschungseisbrecher, der »Polarstern«, und unterstützt durch den russischen Eisbrecher »Akademik Fedorov« können wir eine Breite von etwa 85 Grad Nord erreichen. Hier schalten wir die Maschinen in den Leerlauf und lassen uns ins Eis einfrieren.

Die »Akademik Fedorov« fährt dann zurück, und die natürliche Drift des Eises trägt uns am Nordpol vorbei, und zwar von der sibirischen Seite der Arktis über den Nordpol in Richtung Grönland, so dass wir etwa ein Jahr später in der Framstraße zwischen Grönland und Spitzbergen wieder herauskommen *(siehe Grafik S. 60)*.

Als Erster und bislang Einziger wagte der Polarpionier Fridtjof Nansen vor gut 120 Jahren eine solche Unternehmung. Er verbrachte fast drei Jahre im Eis. Sind Sie schneller, weil es weniger Meereis in der Arktis gibt? Oder beschleunigt sich die Transpolardrift?
Fridtjof Nansen hat in einer gewaltigen Pionierleistung der Polarforschung von 1893 bis 1896 gezeigt, dass solch eine Expedition funktioniert. Er hat die Transpolardrift entdeckt und das erste Schiff – ein hölzernes Segelschiff – konstruiert, welches auf Grund seiner Bauweise im Eis nicht zerdrückt wurde, sondern sich nach oben heraushob. Somit ist er dem tödlichen Schicksal aller vorherigen Expeditionen entgangen. Drei Jahre später kam er in der Framstraße wieder aus dem Eis heraus – die übrigens nach seinem Schiff, der »Fram«, benannt ist.

Heutzutage ist das Eis nur noch etwa halb so dick wie zu Nansens Zeiten. Damit ist es auch weniger steif und setzt dem Wind einen geringeren Widerstand entgegen. Daher hat sich die Drift tatsächlich beschleunigt. Zum anderen hatte Nansen im Gegensatz zu uns keinen Eisbrecher. Er musste also bis zur Eiskante fahren, sich dort einfrieren lassen und dann warten, bis er wieder »ausgespuckt« wurde. Durch das vergleichsweise dünne Eis im Sommer können wir jedoch am Anfang hineinbrechen und müssen im nächsten Sommer auch nicht warten, bis es uns wieder frei gibt.

Nansen wollte den geografischen Nordpol erreichen. Was sind Ihre Forschungsziele heute?
Wir wollen die wesentlichen Prozesse, die sich im Klimasystem in der Zentralarktis abspielen, ganzjährig beobachten. Bisher hatten wir keine Gelegenheit, im Winterhalbjahr dorthin zu gelangen. Daher gibt es zwar simple Beobachtungen von automatischen Driftbojen, die selbstständig Temperaturen und Luftdruck messen können, doch uns geht es um viel komplexere Zusammenhänge, die man nur selbst vor Ort messen und untersuchen kann.


ALFRED-WEGENER-INSTITUT

Markus Rex
leitet den Bereich Atmosphärenforschung am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) und ist Professor an der Universität Potsdam. Er studierte Physik, Meteorologie sowie Geophysik in Göttingen und Braunschweig. Auf seine Promotion an der Freien Universität Berlin und Habilitation an der Universität Bremen folgten Stationen am Jet Propulsion Laboratory der NASA, am California Institute of Technology sowie an der University of Canterbury in Christchurch, Neuseeland. Rex wurde unter anderem mit dem Ernst-Reuter-Preis der Freien Universität Berlin und dem Dobson Award der International Ozone Commission ausgezeichnet.

Dazu richten Sie auf dem Meereis auch zahlreiche Messstationen ein. Was bauen Sie dort alles auf?
Sobald wir Anfang, Mitte Oktober in der Region ankommen, in der wir uns einfrieren lassen, geht ein spannender Wettlauf mit der hereinbrechenden Polarnacht los. Ab Ende Oktober ist es in diesen Breiten auch tagsüber stockdunkel, was die Arbeit deutlich erschwert. In der kurzen Zeit bis dahin werden wir mit Helikoptern und unserem Partnereisbrecher ein Netzwerk von Stationen in bis zu 50 Kilometer Entfernung zur »Polarstern« auf dem Eis aufbauen. Diese Stationen werden mit autonomen Messgeräten ausgestattet und später im Winter von Helikoptern besucht und gewartet.

Das Forschungsteam bleibt aber auf der »Polarstern«?
Wir werden direkt neben dem Schiff auf unserer »Heimat-eisscholle« ein gewaltiges Forschungscamp mit großer, schwerer Infrastruktur und Messgeräten errichten. Dort wird ein Großteil der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler jeden Tag arbeiten, zum Schlafen jedoch aus Sicherheitsgründen auf das Schiff zurückkehren.

Sie werden fünf komplexe Themen genauer betrachten ***(siehe »Das arktische Klimasystem verstehen«, rechts)*****. Auf welche Erkenntnisse sind Sie besonders gespannt?**
Vor allem interessiert mich die Energiebilanz der Oberfläche, weil sie viele Aspekte umfasst. Sie bestimmt sich aus dem Wärmefluss aus dem Ozean durch das Meereis an die Oberfläche, dem Wärmefluss in der Atmosphäre durch Verwirbelungen von der Oberfläche bis tief in sie hinein und zuletzt aus den Strahlungsbilanzen: zum einen der ankommenden und absorbierten sowie der zurückreflektierten Sonnenstrahlung und zum anderen der Wärmestrahlung, die aus der Atmosphäre und den Wolken von oben nach unten kommt, sowie der Wärmeausstrahlung vom Untergrund. Das sind ja schon eine ganze Menge Komponenten, und wenn man das System genauer betrachtet, müssten eigentlich noch Kondensations- und Verdunstungsprozesse von Wasserdampf mitberücksichtigt werden. Daher ist dieser Komplex ein integrierender Teil. Wir müssen da sehr vieles sehr richtig machen, um die ganz grundsätzliche Energiebilanz, die Wärmebilanz des arktischen Klimasystems, besser zu begreifen. Schon an Bord, wenn die ersten Messungen ankommen, werden wir mehr von diesem Zusammenhang verstehen.

»Wir werden die Daten jahrzehntelang nutzen«

Zweitens beschäftigen mich persönlich besonders die Strahlungseigenschaften der Wolken: Unter welchen Umständen wirken die Wolken erwärmend und unter welchen abkühlend, welche Eigenschaften haben sie, welche Eisanteile weisen sie auf, und wie hängt das mit den Prozessen an der Oberfläche zusammen? Wenn die Wasseroberfläche durch einen Riss im Eis in Kontakt mit der sehr kalten Atmosphäre kommt, dringen gewaltige Wasserdampfmassen und Energiemengen vom Ozean in die Atmosphäre ein. Der Wärmefluss erfolgt also nicht gleichmäßig durch das Eis, sondern ein großer Teil davon findet statt, wenn es durch Wind aufbricht und Risse bildet. Das geschieht extrem selten. Wenn jetzt die im Vergleich zur darüberliegenden Luft geradezu heiße Wasseroberfläche mit minus 1,5 bis minus 1,8 Grad in direkten Kontakt mit der minus 40 Grad kalten Atmosphäre kommt, schießen gewaltige Mengen an Wärme und Wasserdampf in diese ein. Derartige Prozesse an den Rissen sind entscheidend für die Wolkenbildung und die Energiebilanz der Arktis.

Wie werden Sie die riesige Datenmasse handhaben, die Sie mit all Ihren Messungen produzieren?
Mit dieser Datenmenge muss man überhaupt erst einmal sinnvoll umgehen können. Daher haben wir ein eigenes Datenwissenschaftsteam im Projekt. Wir werden die Daten erst einmal sehr strukturiert und geordnet mit allen zugehörigen Metadaten ablegen, das heißt den Informationen über die verwendeten Messgeräte oder über die Bedingungen, unter denen sie aufgenommen wurden. So stellen wir sicher, dass auch zukünftige Generationen sie finden und verwenden können.

An Bord werden wir nur in begrenztem Umfang Auswertungen machen können. Da wir keine gute Satellitenverbindung haben, bekommen wir die Daten aber nicht von Bord gefunkt. Die zentrale Arktis ist tatsächlich der letzte Platz auf diesem Planeten, an dem man in der Kommunikation heute noch sehr eingeschränkt ist. Wir können keine der üblichen Kommunikationssatelliten benutzen, da diese um den Äquator kreisen, und so sind wir auf sehr rudimentäre Verbindungen mit polarumlaufenden Satelliten zurückgeworfen, die aber keine großen Übertragungsraten zulassen. Im Wesentlichen werden die Daten daher mit Festplatten zurück an Land verschifft.

Wie lange wird es schätzungsweise dauern, bis die Daten ausgewertet sind?
Die ersten Festplatten werden nach gut drei Monaten mit unseren Partnereisbrechern zurückkommen, dann immer im Abstand von zwei bis drei Monaten. Bereits während der Expedition und in den ersten Monaten danach werden wir die wichtigsten Ergebnisse finden und publizieren. Anschließend werden wir aus diesen Daten aber für viele Jahre immer wieder neue Erkenntnisse ziehen. In keiner absehbaren Zukunft wird noch einmal ein vergleichbares Forschungsprojekt in der Lage sein, solche Beobachtungen in der Zentralarktis im Winter zu machen, so dass wir die Daten auf Jahrzehnte hinaus als Referenz nutzen werden, um das Klimasystem in der Arktis zu beschreiben.

Das Ziel Ihrer Beobachtungen sind letzten Endes bessere Klimamodellierungen und Prognosen. Warum müssen Sie dazu bis fast zum Nordpol fahren?
Im Moment ist die Arktis die Region unseres Planeten, in dem unsere Klimaprognosen die größten Unsicherheiten aufweisen. Wir verstehen das arktische Klimasystem einfach nicht sehr gut. Für ein pessimistisches Treibhausgas-Szenario – bei dem wir annehmen, dass wir es nicht schaffen, unsere Emissionen massiv zu reduzieren – gehen einige Modelle davon aus, dass sich die Arktis bis zum Ende des Jahrhunderts um 5 Grad Celsius erwärmen wird, andere sprechen von sage und schreibe 15 Grad. Mit solch einer großen Unsicherheit lässt sich nicht vernünftig planen. Die Arktis ist also nicht nur die Region, die sich am dramatischsten und am schnellsten erwärmt, sondern auch die, in der wir das Klimasystem und sein Verhalten am schlechtesten verstehen und vorhersagen können.

Das arktische Klimasystem verstehen

Auf dem Eis wird ein großes Forschungscamp aufgebaut, Dreh- und Angelpunkt für unzählige Messungen und Untersuchungen (im Bild ist eine Auswahl zu sehen). Die gewonnenen Erkenntnisse sollen helfen, fünf wichtige Komplexe besser zu verstehen:

Atmosphäre

- Wolken: Bildung, Wechselwirkung mit Aerosolpartikeln, Strahlungseigenschaften, wärmende/kühlende Wirkung
- Wolkenzusammensetzung, Gefrierverhalten und Niederschlagsbildung
- Wärmefluss zwischen Ozean, Eis und Atmosphäre
- Wärmebilanz der Oberflächenschicht

Ökosystem

- Biomasse und Artenzusammensetzung in Ozean und Meereis
- Verhalten, Physiologie und genetische Ausprägungen im Jahresgang

Biogeochemie

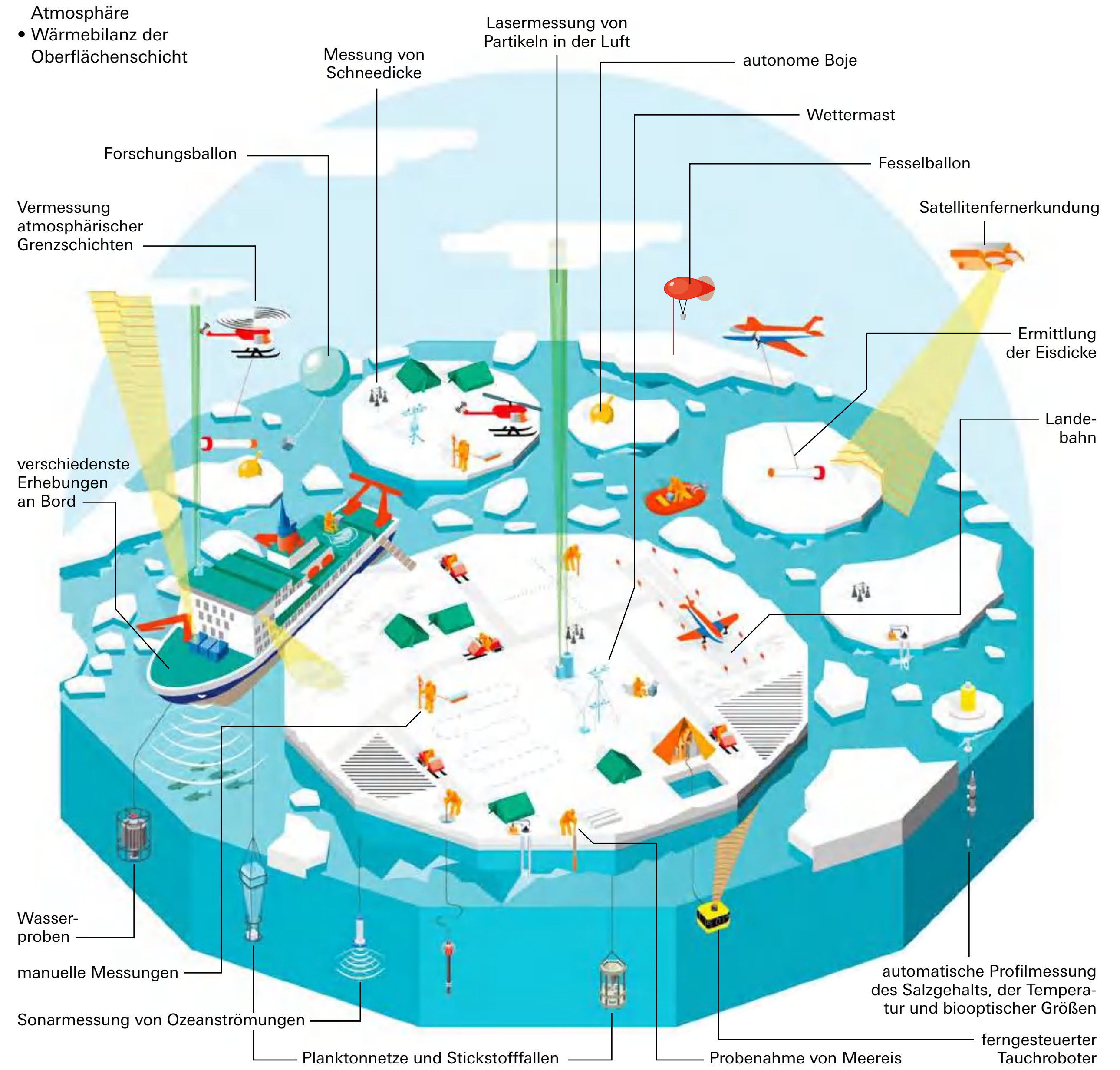
- chemische Prozesse im Ökosystem
- Eintrag und chemische Umsetzung in die Atmosphäre
- Wechselwirkung mit Aerosolen, Wolken und Strahlung

Ozean

- großräumige Zirkulation und Dynamik
- Schichtung und Wirbel
- Wärme-, Wassermassen- und Stofftransporte
- Wechselwirkung mit Meereis und Atmosphäre

Meereis

- Gefrierprozesse, Verfestigung, mechanische Eigenschaften
- Verhalten während der Drift und Verformung
- Schmelzprozesse, Schmelztümpelbildung
- Wärme- und Stoffflüsse
- Rolle der Schneeauflage



ALFRED-WEGENER-INSTITUT / MARTIN KÜNSTING; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Dabei soll uns gerade die Arktis helfen, das Klima im Rest der Welt besser zu modellieren. Warum spielt sie solch eine Schlüsselrolle?
Was in der Arktis an Erwärmung passiert, bleibt nicht in der Arktis. Sie ist die große Wetterküche für die nördlichen mittleren Breiten, in denen ein Großteil der Weltbevölkerung lebt – für Nordamerika, Europa und große Teile Asiens. Der Temperaturkontrast zwischen der kalten Arktis und den wärmeren mittleren Breiten treibt das Hauptzirkulationssystem der nördlichen Hemisphäre an: den so genannten Jetstream in etwa zehn Kilometer Höhe, ein Westwindband, das um die Arktis herum weht. Das isoliert die kalten arktischen Luftmassen von den wärmeren in unseren Breiten. Wenn sich jetzt aber die Arktis sehr viel schneller erwärmt als der Rest der Welt, nimmt dieser Temperaturunterschied ab. Der Motor des Westwindbands fängt an zu stottern, so dass es instabiler wird und mehr dazu neigt, Wellen zu werfen und sich in einer mäandrierenden Bewegung um den Nordpol zu bewegen. In der Folge stoßen mehr Luftmassen nach Norden beziehungsweise Süden vor, was einerseits zu Kaltluftausbrüchen aus der Zentralarktis bis in unsere besiedelten Breiten führt. Das geschah beispielsweise im Spätwinter 2018, als wir in Europa eine sehr späte, lange Kaltphase hatten. Wenn sich der Jetstream hingegen nach Norden ausbeult, gelangen heiße, subtropische Luftmassen bis in unsere Breiten und produzieren sehr heiße Sommer wie 2018 oder, wie es sich momentan abzeichnet, auch dieses Jahr. Solche Extremwetterlagen werden durch die Erwärmung der Arktis noch intensiver. Die Klimaerwärmung kann sich also als kurze Phasen sehr hoher, aber auch sehr tiefer Temperaturen äußern. Das steht nicht im Widerspruch zur globalen Erwärmung, sondern ist gerade Teil des gesamten Trends.

Sie können jetzt, gut 120 Jahre nach Nansen, diese Expedition machen. Schippern noch einmal 120 Jahre später Kreuzfahrtschiffe über den Nordpol?
Es genügt schon, wenn wir auf die nächsten Jahrzehnte blicken, für die wir die Entwicklung etwas besser absehen können: Wenn wir den Rückgang des arktischen Meereises aus den letzten Jahrzehnten weiter in die Zukunft extrapolieren, würde die Arktis in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts im Sommer eisfrei werden. Dieses Szenario ist absolut nicht an den Haaren herbeigezogen, es ist bei unseren derzeitigen Treibhausgasemissionen die wahrscheinlichste Entwicklung. Dann können Sie mit einer Jolle von Hamburg zum Nordpol segeln, eine Flasche Sekt aufmachen und wieder zurückfahren. Wo über Generationen hinweg wagemutige Polarforscher mit ihren Schiffen vom Eis zerdrückt wurden und ganze Expeditionsteams im Eis umgekommen sind, finden Sie einen offenen Ozean vor. Das ist eine andere Welt. Das kann man sich kaum vorstellen.

Man kann sich ebenfalls kaum vorstellen, was das für das Klimasystem bedeutet. Denn das Wasser absorbiert viel mehr von der einfallenden Sonnenstrahlung als eine



Die »Polarstern« bricht durch das Meereis durch, wenn dieses seine geringste Ausdehnung hat (weiß; Winterausdehnung: hellblau). Anschließend bringt die Transpolardrift den Eisbrecher von Sibirien bis in die Framstraße zwischen Spitzbergen und Grönland. Rund 350 Tage dauert die Drift. Die 100 Personen starke Mannschaft wird währenddessen sechsmal ausgetauscht.

Eisoberfläche, die einen Großteil einfach zurückreflektiert. Dadurch wird die Wärmeaufnahme viel größer, und ebenso der Energie- und Wasserdampffluss vom Ozean in die Atmosphäre. Wir bewegen uns damit weit aus dem uns bekannten Bereich des Klimasystems heraus, so dass wir kaum noch verlässliche Vorhersagen machen können, was das für den Rest der Welt bedeutet. So ein Klima hat die Menschheit noch nicht erlebt. Dort können Mechanismen zum Zuge kommen, die wir bisher noch gar nicht kennen.

Besonders wichtig sind hier bestimmte Punkte im Klimasystem, an denen es kein Zurück mehr gibt. Das sind so genannte Kipppunkte, die, einmal überschritten, zu einer sich selbst verstärkenden weiteren Entwicklung führen. Wenn wir beispielsweise das arktische Meereis verlieren, wird die Arktis durch die erhöhte Absorption von Sonneneinstrahlung und durch die Wasserdampfflüsse, die dann in die Atmosphäre gelangen, von allein so viel wärmer, dass es schwer ist, das System wieder abzukühlen. Und das erhöht das Risiko dramatisch, einen weiteren Kipppunkt auszulösen: den Verlust des grönländischen Eisschilds.

Auf Grund der Perspektive, dass das Eis auftaut, melden Nationen ihre Ansprüche auf Rohstoffvorräte in der Arktis an *(siehe Artikel ab S. 48)*. Merken Sie davon etwas bei Ihrer Forschung?
An der Expedition »MOSAiC« (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate) sind 17 Nationen beteiligt, darunter so verschiedene Länder wie die USA, China, Russland und viele der europäischen Staaten, die höchst unterschiedliche geopolitische Interessen in der Arktis haben. Diese prallen sonst oft aufeinander und

machen die Arktis zu einer konfliktträchtigen Region. Aber das schlägt nicht durch auf die sehr effiziente, freundschaftliche und vertrauensvolle Zusammenarbeit im Bereich unserer Forschung und in unserer internationalen MOSAiC-Gruppe. Wir gehen gemeinsam die großen Fragen im Bereich der arktischen Klimaforschung an. Ich glaube, dass dies einen Beitrag dazu leisten kann, dass wir in einer sonst umstrittenen Region der Erde sehr partnerschaftlich miteinander umgehen. Außenminister Heiko Maas hat in einer Rede im UN-Sicherheitsrat die MOSAiC-Expedition als ein Beispiel dafür genannt, wie die gute Zusammenarbeit der Nationen der Erde funktionieren sollte. Es gibt also Ausstrahlungseffekte weit über den wissenschaftlichen Bereich hinaus. Und diese können dazu beitragen, dass Länder sich weiterhin austauschen, bei denen andernfalls Kommunikationskanäle unter Umständen verloren gehen, weil die Interessen zu unterschiedlich sind.

Welche Berührungspunkte haben Sie mit den indigenen Völkern, die in der Arktis leben?
Wir sind in ständigem Kontakt mit den Vertretern der indigenen Bevölkerung, weil wir denken, dass wir viel von ihnen lernen können. Außerdem beeinflusst unsere Arbeit sehr stark, wie die Arktisbewohner ihre Zukunft planen können. Denn sie müssen wissen, wie es mit dem Klima weitergeht, und wir müssen andererseits von ihnen erfahren, welche Informationen sie genau benötigen. In den ersten sechs Wochen unserer Expedition wird im Rahmen einer Summer School für Studenten auch ein Vertreter der indigenen Bevölkerung an Bord sein. Er wird ihnen vermitteln, was diese von der Wissenschaft erwartet, damit sie ihre Lebensbedingungen und ihre Planung verbessern kann.

Wie erleben die Menschen, die dort zu Hause sind, die Veränderungen in der Arktis?
Für die Menschen in unseren Breiten findet der Klimawandel im Wesentlichen noch in den Medien statt. Man hört davon, liest darüber, hat vielleicht die erste eigene Anschauung, aber um den Klimawandel bei uns nachzuweisen, braucht man schon hochkalibrierte Messinstrumente und gute Statistiken. Für jeden Vertreter der indigenen Bevölkerung der Arktis sowie für jeden, der regelmäßig dorthin reist, ist die Veränderung jedoch offensichtlich: Die Welt sieht anders aus. Um das zu bestätigen, benötigt man kein Messgerät, man muss nur aus dem Fenster schauen. Wenn ich früher in der Arktis im Bereich unserer Forschungsstation im Februar aus dem Fenster geblickt habe, sah ich eine gefrorene Landschaft, weiße, glitzernde Schneekristalle und blaue Eisblöcke. Nun liegt dort eine offene Wasseroberfläche, auf der Boote fahren. Die Frage, ob der Klimawandel existiert, ist für die Bevölkerung in der Arktis absurd. Diese Perspektive dem Rest der Welt zu vermitteln, halte ich für einen wichtigen Beitrag, den die Arktisbewohner leisten können.

Welche Vorbereitungen laufen jetzt noch, in den letzten Wochen?
Unser Schiff wird derzeit fit gemacht und aufgerüstet. Wir haben gerade einen neuen Bugkran aufgebaut, um auch über dem Eis Messungen zu machen, wenn wir das Eis nicht betreten können. Außerdem installieren wir eine Art Warmlufthaube, damit unsere Messinstrumente, die wir aus 3000 bis 4000 Meter Tiefe aus dem Meer holen, nicht durch plötzlichen Kontakt mit der minus 40 Grad kalten Atmosphäre Schaden nehmen. Dazu kommen noch neue Windensysteme, um durch ein Loch im Schiff Messgeräte in den Ozean abzulassen, ohne dass wir dafür durch das dicke Eis hindurchbohren müssen.

Machen Sie sich Sorgen, wenn Sie an das nächste Jahr denken?
Vor medizinischen Notfällen und Unfällen, die sich an Bord oder auf dem Eis ereignen können, habe ich schon Respekt. Je nachdem, wohin die Drift uns führt, werden wir uns phasenweise sogar außer Reichweite der leistungsfähigsten Langstreckenhelikopter aufhalten, obwohl wir für diese extra Treibstoffdepots auf den nördlichsten der sibirischen Inseln errichtet haben. Daher haben wir Pläne, um mit allen Notfällen an Bord umgehen zu können. Wir haben einen Chirurgen mit Zusatzausbildungen in anderen medizinischen Bereichen sowie eine zur Krankenschwester ausgebildete Person an Bord, so dass wir auch Operationen durchführen können. Trotzdem sind manche Dinge möglicherweise nicht genauso zu beherrschen wie in einem Krankenhaus.

»Die Veränderung ist schon jetzt offensichtlich«

Der zweite Bereich sind die arktischen Witterungsbedingungen. Man muss wissen, wie man sich verhält, damit es nicht zu Unterkühlungen, Erfrierungen oder Ähnlichem kommt. Aus diesem Grund haben wir neben wissenschaftlichen Trainings Schulungen durchgeführt, wie man sicher auf dem Eis und unter arktischen Gegebenheiten arbeitet. Denn selbst wenn alles heutzutage sehr viel planbarer und sicherer abläuft als zu Nansens Zeiten, muss man sich immer wieder klarmachen: Wir sind in der Zentralarktis unterwegs, Hilfe können wir – wenn überhaupt – nur nach sehr, sehr langen Zeiträumen bekommen. In dieser lebensfeindlichen Umgebung müssen wir alle sehr genau wissen, was wir tun.

Worauf freuen Sie sich am meisten?
Ich freue mich jetzt erst einmal auf den Start und kann es kaum erwarten, das Land am 20. September endlich hinter mir verschwinden zu sehen. ◂

Die Fragen stellte **Spektrum**-Redakteurin **Verena Tang**.

WEBLINKS

Expedition mitverfolgen: www.mosaic-expedition.org

Mehr über die »Polarstern«:
www.awi.de/expedition/schiffe/polarstern.html

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN
DAS VIELFÄLTIGE INNERE DER KASTANIEN

Die Samen der Rosskastanie eignen sich hervorragend für wissenschaftliche Experimente, als Medizin oder auch zum Wäschewaschen. Denn sie enthalten ein ganzes Bündel an organischen Verbindungen, die verschiedenste Funktionen erfüllen.





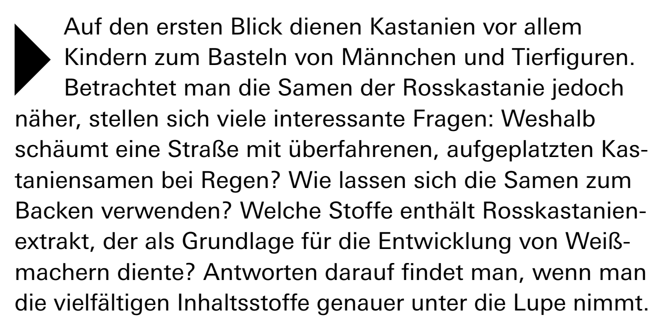
Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** (Mitte) ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg. **Philipp Weber** unterrichtet an der Lothar-von-Kübel-Realschule Sinzheim und ist Lehrbeauftragter am Lehrerseminar Karlsruhe.

⏩ spektrum.de/artikel/1669388



MATTHIAS DUCCI

Mit verdünnter Betaisodona-Lösung lässt sich Stärke in den Samen der Rosskastanie sichtbar machen.



Auf den ersten Blick dienen Kastanien vor allem Kindern zum Basteln von Männchen und Tierfiguren. Betrachtet man die Samen der Rosskastanie jedoch näher, stellen sich viele interessante Fragen: Weshalb schäumt eine Straße mit überfahrenen, aufgeplatzten Kastaniensamen bei Regen? Wie lassen sich die Samen zum Backen verwenden? Welche Stoffe enthält Rosskastanienextrakt, der als Grundlage für die Entwicklung von Weißmachern diente? Antworten darauf findet man, wenn man die vielfältigen Inhaltsstoffe genauer unter die Lupe nimmt.

Zu einem Großteil bestehen die Rosskastaniensamen aus Stärke und Zucker. Während der Zuckernachweis nur mit Laborchemikalien gelingt, lässt sich die Stärke mit einem iodhaltigen Alltagsprodukt sichtbar machen. Hierzu schneidet man einen der Samen auf und tropft mit Wasser verdünnte, braune Betaisodona-Lösung (fünf bis zehn Tropfen auf fünf Milliliter Wasser) aus der Apotheke auf die Schnittfläche. Die zu beobachtende Blaufärbung (siehe Bild oben) rührt daher, dass sich Iodidionen aus der Lösung unter Ausbildung von Polyiodidionen in die spiralförmigen Amylosemoleküle einlagern, die einen Hauptbestandteil der Stärke ausmachen.

Wie man aus Rosskastaniensamen Stärke gewinnt, beschrieb bereits der deutsche Chemiker Justus von Liebig (1803–1873): »Das Stärkemehl ist in den Samen … abgelagert und kann nach dem Zerreissen der Zellen, in denen es eingeschlossen ist, durch Auswaschen mit Wasser leicht erhalten werden. Zerreibt man … Kastanien … und wäscht den Brei auf einem feinen Siebe mit Wasser aus, so setzt sich … Stärkemehl in Gestalt eines blendend weissen sehr feinen Pulvers ab …«

Im Experiment haben wir auf diese Weise strahlend weißes Stärkemehl erhalten. Tatsächlich waren Kastaniensamen selbst in jüngerer Vergangenheit als Nahrungsmittel von größerer Bedeutung, insbesondere in Zeiten großer Not wie nach den Weltkriegen.

Aus dem so gewonnenen Stärkemehl kann man nun durch Aufschlämmen in heißem Wasser Stärkekleister herstellen. Darauf weist schon die »Oeconomische Encyclopädie« hin, die der Naturwissenschaftler und Arzt Johann Georg Krünitz (1728–1796) im Jahr 1773 begründet hat. Ziel war es damals, wertvolles Speisemehl bei der Herstellung von Stärkekleister einzusparen.

Krünitz' Werk erschien von 1773 bis 1858 in über 242 Bänden und stellt heute eine der wichtigsten deutschsprachigen wissenschaftsgeschichtlichen Quellen für die Zeit des Wandels zur Industriegesellschaft dar. Es vermittelt unter anderem einen umfassenden Überblick über die histori-

sche Verwendung von Rosskastaniensamen. Hier findet man – wie übrigens auch im Kräuterbuch des Matthiolus aus dem Jahr 1565 – Hinweise darauf, dass die Samen als Heilpflanze bei erschöpften und kranken Pferden eingesetzt wurden: Türkische Pferdeknechte gaben sie ihren Rössern bei Husten und Lungenerkrankungen zu fressen. Den Grund für die schleimlösende Wirkung erfährt man, wenn man sich die übrigen Bestandteile des Rosskastaniensamens ansieht.

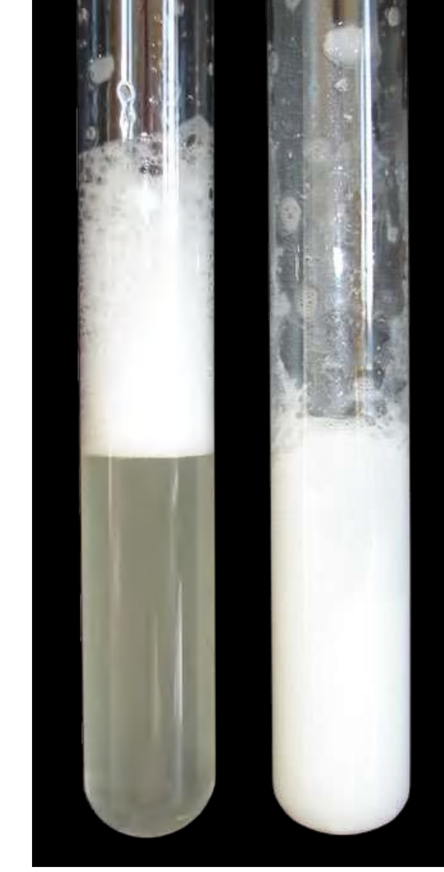
Neben Stärke und Zucker sind dies Proteine, Öle, Mineralstoffe und Aescin. Letzteres ist ein Gemisch aus zahlreichen Einzelkomponenten, das im Wesentlichen aus strukturellen Abwandlungen des Barringtogenols C sowie des Protoaescigenins besteht (Grafik unten). In den Samen der Rosskastanie liegen diese Verbindungen gebunden an andere Moleküle vor: Die Hydroxygruppe (OH-Gruppe) an Ring A ist mit Zuckermolekülen zu so genannten O-Glykosiden verbunden, und die beiden OH-Gruppen an Ring E binden an verschiedene organische Säuren, beispielsweise Angelikasäure oder Tiglinsäure.

Saponine: Schaum bildende Inhaltsstoffe

Derartige Stoffe besitzen polare (wasserlösliche) und unpolare (wasserunlösliche) Bereiche und verursachen daher einen seifenartigen Schaum, wenn sie in Wasser geschüttelt werden. Aus diesem Grund bezeichnet man die Stoffe als Saponine (von lateinisch: sapo für Seife). Beim Schütteln wird Luft in die Saponinlösung eingebracht. Bei der Schaumbildung entsteht eine Doppelschicht aus den oben genannten Molekülen, welche eine dünne Schicht Wasser einschließt. Das ist quasi die »Haut« der Schaumblase, innerhalb der sich Luft befindet. Die Doppelschicht heißt Lamelle. Dabei zeigen die polaren Enden der Moleküle aus der Saponinlösung auf beiden Seiten der Lamelle jeweils zur (polaren) Wasserschicht und die unpolaren in Richtung (unpolarer) Luft. Die Saponine lassen sich mit der Schaumprobe nachweisen.

Zunächst wird dazu eine Kastanie mit einem Hammer zerkleinert. Die braune Schale verwirft man und zerreibt die hellen Bruchstücke mit einer Reibe. 0,5 Gramm dieses Kastaniensamenmehls gibt man in ein Reagenzglas und füllt dieses bis zu einem Drittel mit etwa 70 Grad heißem Wasser auf. Die Suspension lässt man rund zehn Minuten abkühlen, bevor das Reagenzglas mit einem Stopfen verschlossen und ungefähr zehn Sekunden lang intensiv geschüttelt wird. Hierbei bildet sich eine etwa vier Zentimeter hohe Schaumkrone aus. In ein zweites Reagenzglas gibt man herkömmliche Kernseifenlösung und schüttelt diese ebenfalls, woraufhin man eine ähnliche Schaumkrone sieht. Fügt man jetzt wenige Tropfen verdünnte Salzsäure in beide Reagenzgläser, ist ein deutlicher Unterschied festzustellen: Die Schaumkrone der Kernseifenlösung verschwindet, und die Lösung trübt sich weißlich, da durch Zugabe der Säure hier wasserunlösliche Fettsäuren entstehen. In der Saponinlösung besteht sie hingegen fort, weil die Säure die enthaltenen Moleküle chemisch nicht verändert.

Strukturformel für Barringtogenol C (R = H) und Protoaescigenin (R = OH).



Schaumprobe mit Mehl aus Kastaniensamen (links) und mit Kernseife (rechts).

MATTHIAS DUCCI

Da Saponine giftig für Pilze sind, dienen sie Pflanzen als Abwehrstoffe. Der Gehalt an Aescin schwankt abhängig von den Jahreszeiten und dem Reifegrad der Samen stark von Baum zu Baum. Es ist nachgewiesen, dass Saponine auch schleimlösend wirken – damit erklärt sich die Heilanwendung bei kranken Pferden. Darüber hinaus war das Samenmehl Bestandteil in einigen Schnupftabaksorten.

Nach dem Zweiten Weltkrieg spielten Rosskastaniensamen eine bedeutende Rolle als Waschmittel, und zwar nicht nur in Privathaushalten, sondern ebenso für die Waschmittelproduktion in Fabriken. Heute, da der ökologische Gedanke einen hohen Stellenwert besitzt, weisen einige Publikationen wieder darauf hin, dass sich Kastaniensamen analog zu Waschnüssen als biologischer Waschmittelersatz eignen.

Mit einem Ethanol-Wasser-Gemisch im Verhältnis 1 : 2 lassen sich größere Mengen von Saponinen aus den Rosskastaniensamen extrahieren. Dazu reibt man die Kastanien zuerst mit Hilfe einer Nussreibe zu Mehl, suspendiert dieses dann in einem solchen Ethanol-Wasser-Gemisch und kocht das Ganze eine Stunde lang unter Rückfluss. Nach dem Filtrieren erhält man eine gelbe Saponinlösung. Diese kann man noch konzentrieren, indem man das Lösungsmittel teilweise abdampft. Mit etwas Zitronensäure, die gegen Schimmelbildung hilft, wird aus dem Konzentrat eine haltbare Flüssigseife. Angenehmer duftet sie noch, wenn man natürliche Aromastoffe wie Zitronenbackaroma hinzugibt.

Das Produkt hat eine hohe Waschwirkung, die auf den oberflächenaktiven Eigenschaften infolge der polaren und unpolaren Bereiche der Molekülstruktur beruht. Sogar Harzflecken kann das auf diese Weise hergestellte Waschmittel entfernen.

Eine kurze Geschichte der Rosskastanie

Entgegen der weit verbreiteten Meinung war die Rosskastanie *(Aesculus hippocastanum)* nicht immer bei uns heimisch, sondern ist ein klassischer Rückkehrer. Zwar belegen Fossilienfunde, dass die Art bereits im Tertiär in Mitteleuropa wuchs; die starke Abkühlung zu Beginn des Quartärs vor rund zwei Millionen Jahren und die einsetzende Eiszeit verdrängten sie jedoch immer weiter nach Süden. Im Gegensatz zu anderen Arten schaffte es die Rosskastanie aber, dem Aussterben zu entgehen und in kleinen Arealen auf dem Balkan zu überleben.

Bei ihren Feldzügen verfütterten die Türken im 15. und 16. Jahrhundert die Samen der Rosskastanie an ihre Pferde und brachten sie so wieder nach Mitteleuropa. Der französischstämmige Arzt und Botaniker Carolus Clusius erhielt 1576 als Hofbotaniker in Wien die ersten Samen des Baums aus Konstantinopel, von wo aus die Pflanze in Europa verbreitet wurde. Insbesondere nachdem der französische König Ludwig XIV. (1638–1715) die Rosskastanie zu seinem Lieblingsbaum erklärt hatte, wurde es große Mode, diese in Alleen, Parks und Gärten anzupflanzen.

Ihren Gattungsnamen *Aesculus*, ursprünglich der lateinische Name einer Eichenart, verdankt die Rosskastanie Carl von Linné (1707–1778), dem Begründer der Artdiagnostik und der binären Nomenklatur. Möglicherweise deutet diese Bezeichnung darauf hin, dass die Samen als Viehfutter verwendet wurden (lateinisch: esca für Futter). Der Begriff Kastanie hat seinen Ursprung wahrscheinlich in der Ähnlichkeit der Samen mit den Früchten der Esskastanie (griechisch: kastanon). Letztere gehört jedoch zur Familie der Buchengewächse und ist nicht mit der Rosskastanie verwandt. Darauf könnte die Bezeichnung Ross hinweisen, die in der alten indoeuropäischen Sprache für »falsch« oder »unecht« steht. Oder aber der Name Rosskastanie bezieht sich auf die frühere Verwendung als Pferdearznei. *Hippocastanum* wäre damit eine nachträgliche Rückübersetzung des Namens Pferdekastanie (griechisch: hippos für Pferd).

Ähnlich wie andere Seifen oder Tenside setzen Saponine darüber hinaus die Oberflächenspannung des Wassers herab. Das zeigt sich, indem man einem »Wasserberg« wenige Tropfen Saponinlösung zusetzt. Hierzu füllt man ein Glas randvoll mit Wasser und gibt anschließend eine Münze oder Schraubenmutter nach der anderen ganz vorsichtig und langsam hinein. Mit jeder Münze erhebt sich der Wasserberg höher über den Glasrand. Sobald man einige Tropfen Saponinkonzentrat hinzufügt, verliert die Wölbung an Stabilität, und Wasser läuft aus dem Glas heraus.

In den Samen der Rosskastanien sind auch einige Flavonoide enthalten, vor allem Quercetin und Kämpferol (Bild unten). Die meisten Stoffe dieser Klasse sind starke Antioxidanzien und fangen freie Radikale ab, die sonst Zellen schädigen könnten. Daher befinden sie sich überwiegend in den Randschichten von Pflanzen sowie den äußeren Blättern.

Darüber hinaus können sie als pH-Indikatoren durch eine Farbänderung anzeigen, ob eine wässrige Lösung sauer oder alkalisch reagiert. Um das zu zeigen, geht man zunächst so vor wie bei der Schaumprobe: Ein Rosskastaniensamen wird zerkleinert und das Mehl oder kleinste Bruchstücke etwa einen Zentimeter hoch in ein Reagenzglas gegeben. Daraufhin füllt man dieses zur Hälfte mit warmem Wasser, verschließt es mit einem Stopfen und schüttelt es zwei Minuten lang. Einen Milliliter der überstehenden Lösung überführt man in ein zweites Reagenzglas und fügt einige Tropfen Sodalösung hinzu (1 Gramm Soda – Na_2CO_3 – in 10 Milliliter Wasser). Dadurch färbt sich die zunächst weißlich trübe Lösung intensiv gelb, da nun vermehrt Hydroxidionen (OH^--Ionen) in der alkalischen Lösung vorhanden sind. Diese stammen aus dem Carbonat/Hydrogencarbonat-Gleichgewicht, das sich ausbildet, wenn sich Soda im Wasser löst (das Symbol »aq« steht für »in Wasser gelöst«, »l« bedeutet »flüssig«):

$$CO_3^{2-}(aq) + H_2O(l) \rightarrow HCO_3^-(aq) + OH^-(aq)$$

Carbonation + Wassermolekül → Hydrogencarbonation + Hydroxidion

Die Hydroxidionen in der alkalischen Lösung reagieren mit den Flavonoidmolekülen, konkret »stehlen« sie einer Hydroxygruppe (OH-Gruppe) ein Wasserstoffion (H^+). Durch diese Veränderung schlägt die Farbe des pH-Indikators ins Gelbe um. Gibt man jetzt eine Säure zu der gelben Lösung (das heißt, diese enthält dann vermehrt H_3O^+-Ionen), beispielsweise einige Tropfen Essigessenz, so erhält das Flavonoidmolekül sein Wasserstoffion zurück, und die Lösung entfärbt sich wieder.

Einen besonderen Effekt zeigt die gelbe, alkalische Lösung im abgedunkelten Raum unter UV-Licht: Sie fluoresziert gelbgrün. Ursache hierfür sind unter anderem

Strukturformel der Flavonoide Quercetin (R = OH) und Kämpferol (R = H).

R, OH, HO, O, OH, OH, O

ebenfalls die im Extrakt enthaltenen Flavonoide Quercetin und Kämpferol. Ihre Strukturen sind im alkalischen Medium über größere Teile des Moleküls (oder gar über das gesamte Molekül) starr, so dass sie nicht schwingen oder um einzelne Bindungen rotieren können. Überschüssige Energie geben sie daher in Form von Photonenemission ab, was sich als Fluoreszenz beobachten lässt. Im Sauren sind die Moleküle in ihrer Struktur hingegen weniger starr und geben Energie strahlungslos durch Schwingungen ab.

Ein weiterer Fluoreszenzfarbstoff namens Aesculin befindet sich vor allem in den Zweigen und Ästen von Rosskastanien. Dies demonstriert ein eindrucksvolles Experiment (Bild rechts): Man stellt oder hängt einen frisch abgeschnittenen Kastanienzweig in einem abgedunkelten Raum in ein Glas mit Wasser, das mit UV-Licht bestrahlt wird. Von der Schnittfläche ausgehend bilden sich blau fluoreszierende Schlieren: Der Zweig scheint zu »bluten«.

Aufheller für Waschmittel

Rosskastaniensamen enthalten ebenfalls Aesculin, allerdings zu einem viel kleineren Anteil. Das wirkt beim Waschen mit Kastanien als optischer Aufheller: Aesculin absorbiert UV-Strahlung und emittiert blaues Licht, was die Wäsche für das menschliche Auge noch weißer wirken lässt. Diesen Effekt entdeckte der deutsche Chemiker Paul Krais (1866–1939), der Wolle und Flachs mit aesculinhaltigen Extrakten der Rosskastanie versetzte. Die Wirkung ist zwar nicht von Dauer, die Beobachtungen von Krais waren aber der Ausgangspunkt für die Entwicklung industriell hergestellter Aufheller.

Sogar für medizinische Behandlungen spielen die Extrakte der Rosskastanie eine Rolle. Davon zeugen bereits die Schriften der Benediktinerin und Klostergründerin Hildegard von Bingen, die von 1098 bis 1179 lebte. Auch in der krünitzschen »Oeconomischen Encyclopädie« werden medizinische Anwendungsmöglichkeiten beim Menschen beschrieben: Zerriebene, mit Branntwein vermischte Samen, heißt es dort, sollen beispielsweise gegen Kolikschmerzen helfen.

Zur Behandlung von Venenerkrankungen nutzt man die Rosskastaniensamen schon seit geraumer Zeit. Bei solchen Leiden werden durch Entzündungsreaktionen die Gefäßwände durchlässiger, so dass Flüssigkeit in das umliegende Gewebe austritt und Ödeme verursacht. Aescin als Bestandteil im Rosskastanienextrakt senkt die Durchlässigkeit der Kapillaren für Flüssigkeiten und hemmt dadurch den Entzündungsvorgang. Zudem scheint Rosskastanienextrakt Studien zufolge eine wirksame und sichere Behandlungsoption für chronische Veneninsuffizienz darzustellen. ◂

Rosskastanienextrakt in schwach saurer (links) und alkalischer Lösung (Mitte). Rechts ist die alkalische Lösung unter UV-Licht (Wellenlänge 365 Nanometer) zu sehen.

MATTHIAS DUCCI





MATTHIAS DUCCI

Der »blutende« Kastanienzweig (oben): Von der Schnittfläche eines in Wasser eintauchenden Kastanienzweigs aus bilden sich Schlieren aus Aesculin, die unter UV-Licht blau fluoreszieren. Unten: die Strukturformel von Aesculin.

CH_2OH, O, OH, O, OH, OH, HO, O, O

LITERATUR

Krünitz, J. G.: Oeconomische Encyclopädie. Online verfügbar unter www.kruenitz1.uni-trier.de

Von Liebig, J.: Chemische Briefe (30. Brief). Winter'sche Verlagshandlung, 1878

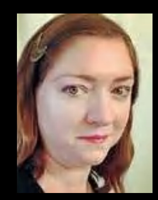
Thorenz, M. et al.: Flavonoide in Rosskastaniensamen. Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule 4, 2008

Weber, P. et al.: Die Chemie der Kastanie – Experimente mit Rosskastaniensamen. Chemie konkret 14, 2007

ASTRONOMIE

BILDER AUS DEM KOSMISCHEN KREISSSAAL

Aufnahmen neugeborener Planeten, noch eingebettet in Gas und Staub, fordern unsere bisherigen Theorien zur Entstehung der Himmelskörper heraus.



Rebecca Boyle ist Wissenschaftsjournalistin in St. Louis im US-Bundesstaat Missouri.

spektrum.de/artikel/1669390

Vor etwa 100 000 Jahren, als noch die Neandertaler in den Höhlen Südeuropas lebten, wurde in der Taurus-Molekülwolke ein Stern geboren: Erst zog sich das Gas durch seine eigene Schwerkraft zusammen. Irgendwann war die Dichte dann so groß, dass Atomkerne miteinander verschmolzen – das Feuer der Kernfusion zündete. Materie, die bei der Entstehung des Sterns übrig geblieben war, kühlte ab und sammelte sich im Umfeld der jungen Sonne in einer Scheibe aus Staubkörnern und Gasschwaden.

Im September 2014 traf Strahlung aus dem jungen, 450 Lichtjahre entfernten Sternsystem die Erde. Astrophysiker fingen sie mit Hilfe von 66 Parabolantennen auf, dem Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA), das auf einer Hochebene in der chilenischen Atacama-Wüste steht, der trockensten Region auf der Erde. Das Observatorium fängt dort, 5000 Meter über dem Meeresspiegel, sehr kurzwellige Radiostrahlung auf, so genannte Submillimeterwellen. Sie kann Wasserdampf in der Atmosphäre nur schlecht durchdringen – daher der Standort im chilenischen Hochgebirge.

ALMA eignet sich wie kein zweites Instrument auf der Erde dafür, junge Sterne und die sie umgebenden Scheiben zu beobachten; Letztere gaben Strahlung im Submillimeterbereich ab. Bei dem jungen Stern aus der Taurus-Molekülwolke, HL Tauri sein Name, erlebten Forscher dank ALMA eine Überraschung: Als sie die 66 Schüsseln auf die junge Sonne ausrichteten, rechneten sie damit, einen hellen, unstrukturierten Fleck zu sehen. Doch nachdem der Supercomputer der Teleskopanlage die gesammelten Radiowellen miteinander kombiniert hatte, zeigte sich eine Scheibe mit einer klar erkennbaren Ringstruktur. Darin waren Lücken zu erkennen, die auf kleine, neugeborene Planeten hindeuteten, die den Stern umkreisen – die Wissenschaftler blickten also in eine Art kosmischen Kreißsaal.

Seitdem haben Astronomen zahlreiche weitere »protoplanetare« Scheiben beobachtet. Ihr Studium ist mittlerweile ein eigenes Gebiet der Astrophysik, denn die Regionen, in denen Planeten entstehen, unterscheiden sich zum Teil stark. Einige sind ordentliche Ovale mit sauberen Bahnen wie auf einer Rennstrecke, andere ähneln eher Miniaturgalaxien mit spiralförmigen Armen. Auf manchen Bildern können die Forscher sogar erkennen, wie sich Planetenembryos bilden: Staub und Gas strömen hier auf rötlich glühende Knollen zu.

Doch je größer die Vielfalt, desto schwieriger wird es für die Astronomen, die Beobachtungen in Einklang mit den Theorien der Entstehung unseres Sonnensystems und anderer Planetensysteme zu bringen. Diese Modelle stehen schon länger auf wackeligen Füßen: Bereits die Entdeckung der ersten Planeten bei anderen Sternen in den 1990er Jahren, so genannter Exoplaneten, zeigte den Forschern, dass ihre Vorstellung von den Abläufen um junge Sonnen ausbaufähig sind.

Kein kosmischer Kreißsaal scheint dem anderen zu gleichen

Inzwischen sind tausende Exoplaneten bekannt – und in den allermeisten Fällen sind sie anders angeordnet als in unserem Sonnensystem. Hier befinden sich die kleinen Gesteinsplaneten nah an der Sonne, große Gasplaneten treiben weiter außen durchs All. Die Mehrheit der bisher entdeckten Exoplanetensysteme zeigt kein derart klares Muster. Seit Forscher damit angefangen haben, protoplane-

ESO/L. CALÇADA (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESO1436F/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

Junge Sterne sind von einer Scheibe aus Gas und Staub umgeben. Heranwachsende Planeten hinterlassen darin ringförmige Spuren, wie diese Illustration andeutet.

ESO/L. CALÇADA (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESO1435F/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

tare Scheiben direkt zu beobachten, ist die Sache noch komplizierter geworden. »Wir sehen dort alle möglichen Strukturen«, sagt die US-Astronomin Kate Follette vom Amherst College im US-Bundesstaat Massachusetts. Auch die zeitlichen Abläufe scheinen anders zu sein als lange vermutet: »Selbst in Scheiben, bei denen wir gedacht haben, sie wären zu jung für die Entstehung von Planeten, scheinen sie sich zu bilden.«

Die vorherrschende Theorie zur Geburt unseres Sonnensystems geht interessanterweise auf Immanuel Kant zurück. 1755 malte sich der deutsche Philosoph aus, die Sonne und ihre Planeten könnten aus einem Nebel aus Gas und Staub entstanden sein. So ähnlich sehen es Forscher noch heute: Demnach entstand die Sonne aus dem kollabierenden Teil einer Molekülwolke, deren Material mehrere Sterne hervorbrachte. Die Sonne war dabei noch eine Zeit lang von einem Ring aus Gas und Staub umgeben, der langsam abkühlte und zu anwachsenden Körnchen kondensierte. Letztere bildeten dann immer größere Körper und schließlich Planetesimale genannte asteroidengroße Objekte, aus denen am Ende die Planeten entstanden.

Theoretiker haben die Einzelheiten des Prozesses seit den 1970er Jahren stetig verfeinert. Dabei haben sie die Anordnung der Planeten im Sonnensystem ebenso berücksichtigt wie die chemische Zusammensetzung von Meteoriten. Bei ihnen handelt es sich nach heutigem Verständnis um übrig gebliebene Bruchstücke aus der Frühzeit des Sonnensystems.

Allmählich etablierten sich zwei konkurrierende Theorien für die Entstehung von kleinen Gesteinsplaneten und großen Gasplaneten (siehe »Wie bildet sich ein Planet?«, S. 69), die Anfang der 2000er Jahre gleichberechtigt nebeneinanderstanden. Laut der einen Theorie, der so genannten Kern-Akkretion, stoßen immer wieder Körper aus Gestein mit großer Energie zusammen. Sie werden dadurch für kurze Zeit flüssig, verschmelzen miteinander und bilden so immer größere Objekte – bis hin zu mehrere tausend Kilometer großen Protoplaneten.

Diese können mit ihrer Schwerkraft große Mengen Gas aus der protoplanetaren Scheibe ansaugen. So könnten im Prinzip Riesenplaneten wie Jupiter entstanden sein, sagen Befürworter des Szenarios. Wenn das Wachstum der Protoplaneten hingegen früher stoppe, entstünden Gesteinsplaneten vom Format der Erde oder des Mars.

Im anderen Szenario, genannt Strömungsinstabilität, durchläuft das Sonnensystem keine solche Phase gewaltiger Kollisionen, sondern eher eine Art von Gerinnung. Gas und Staub in der Umgebung der Sonne kühlen in diesem

Modell rasch ab, formen sich Wirbel und verdichten sich unter der eigenen Gravitation an vielen Stellen. Zentimetergroße Brocken aus Staub und Eis bilden immer größere Ansammlungen, mit einer Größe von einem bis 100 Kilometern. Letztlich bilden sich daraus dann Planetenembryos und schließlich Planeten. Doch weder das eine noch das andere Szenario kann erklären, was wir sehen. Da ist zum Beispiel der Jupiter. Er enthält den Großanteil jener Materie, die nach der Geburt der Sonne übrig geblieben ist. Aber um das mit den bestehenden Modellen zu erklären, müsste sich sein Kern im jungen Sonnensystem extrem schnell gebildet haben. Die Zusammenstöße zwischen Planetesimalen hätten viele Millionen Jahre dafür benötigt.

Theoretiker schätzen jedoch, dass die Scheibe aus Gas und Staub um die frisch geformte Sonne schon nach einer bis zehn Millionen Jahren verschwand. Schließlich müsste der Staub im Umfeld des jungen Sterns von diesem rasch aufgesogen werden, während die freigesetzte Strahlung das Gas fortbläst.

Warum bewegen sich Gasplaneten in anderen Sternsystemen auf fremdartigen Bahnen?

Jüngst zeigten Messungen der NASA-Sonde Juno zudem, dass Jupiters Kern größer ist als bislang angenommen. Der Entstehungsprozess müsste also noch schneller abgelaufen sein als bisher vermutet. Auch eine andere Eigenschaft des Gasriesen ist schwer zu erklären: seine Position im Sonnensystem. Seit den 1970er Jahren spekulieren Theoretiker daher, der Planet könnte im Verlauf seines Entstehungsprozesses nach außen gewandert sein.

Die Probleme der Theorien für Planetenentstehung wurden Mitte der 2000er Jahre noch größer. Astronomen spürten in dieser Zeit immer wieder Riesenplaneten auf, die ihren Mutterstern binnen weniger Tage umkreisen. Andere neu entdeckte Welten zogen ihre Bahnen dagegen in erstaunlich großer Entfernung vom Zentrum, viel größer als die des Jupiters im Sonnensystem.

Trotz stetig verbesserter Computersimulationen konnten weder das Kern-Akkretions- noch das Strömungsinstabilitätsmodell solche Planetensysteme erklären. Eine mögliche Ursache für Planeten auf weiten Umlaufbahnen machte erst 2012 die Runde: Die Astronomen Anders Johansen und Michiel Lambrechts von der Universität Lund in Schweden entwickelten ein Szenario, das Kern-Akkretion und Strömungsinstabilität miteinander verbindet.

Bei dieser »Kieselstein-Akkretion« bildet die bei der Sternentstehung übrig gebliebene Materie lockere Ansammlungen aus Gas und Gesteinsbröckchen. Bereits vorhandene Kleinstplaneten bewegen sich durch diesen Mix und binden rasch weitere Steinchen an sich – ähnlich wie ein Schneeball, der hangabwärts rollt. Dadurch könne sich ein Planet am äußeren Rand der Geburtsscheibe des Sterns bilden und auf seiner Wanderung nach innen immer mehr Steine aufnehmen, erläutert Johansen. Und je nachdem, wie stark die entstehenden Himmelskörper über die Schwerkraft miteinander wechselwirken, kann ein Planet entweder sehr nah an seinem Stern enden oder in sehr großer Entfernung von ihm.

Die Kieselstein-Akkretion gewann rasch an Popularität, da sie es möglich machte, Systeme wie das des eingangs erwähnten Sterns HL Tauri zu erklären. Die dunklen Ringe in der hell leuchtenden Staubscheibe deuteten auf Planeten hin, die weniger als 100000 Jahre alt sind. »Die Entdeckung hat uns sehr inspiriert – sie ist eine Art Bestätigung dafür, dass Planeten wirklich schnell wachsen können«, sagt Astronom Matthew Clement von der University of Oklahoma.

Doch obwohl das Kieselstein-Modell erklären kann, wie Planeten schnell anwachsen, liefert es wenige Erkenntnisse darüber, wie die erste Saat der Planeten – der Beginn des Schneeballs – zu Stande kommt. Die Herausforderung liegt darin, die Lücke zwischen zentimetergroßen Ansammlungen von Staub und Brocken von der Größe eines Mondes zu überbrücken. Früher waren die Forscher bei ihren Simulationen davon ausgegangen, dass sich Gas und Staub gemeinsam bewegen. »Man dachte stets, dass Gas und Staub perfekt aneinander gekoppelt sind«, sagt der Astronom Philip Hopkins vom California Institute of Technology in Pasadena.

Gemeinsam mit seinem Mitarbeiter Jono Squire hat er in Modellen zur Planetenentstehung Gas und Staub voneinander getrennt. So konnten die Forscher komplexe Wechselwirkungen in der protoplanetaren Scheibe untersuchen, bei denen Gas um Staubkörner herumwirbelt – ganz ähnlich wie sich im Wasser Wirbel um Objekte bilden, die auf der Oberfläche treiben. Derartige Gasströmungen werden schnell turbulent und instabil, wodurch der Staub zusammenklumpt – wie Treibgut auf dem Wasser. Solche Modelle könnten neue Einsichten in die Entstehung von Planetesimalen liefern, findet Hopkins. »Damit sieht die Sache plötzlich ganz anders aus.«

Allerdings lauert im Hintergrund bereits ein weiteres Problem. 2013 veröffentlichten der Astrophysiker Subhanjoy Mohanty vom Imperial College London und die jetzt an der Cardiff University tätige Astronomin Jane Greaves eine Übersicht über die protoplanetaren Scheiben in der Taurus-Molekülwolke. Zwar waren die verwendeten Teleskope nicht leistungsstark genug, um Spuren in den Scheiben aufzulösen, wie ALMA sie um HL Tauri gezeigt hat. Doch als die Forscher aufsummierten, wie viel Gas und Staub

AUF EINEN BLICK
DIE VIELFALT DER PROTOPLANETEN

1 Mit einer neuen Generation von Teleskopen können Astrophysiker erstmals detailliert die Gas- und Staubscheiben beobachten, die junge Sterne umgeben.

2 Wiederholt haben Forscher auf diesem Weg so genannte Protoplaneten aufgespürt, die auf den Aufnahmen gerade erst im Entstehen begriffen sind.

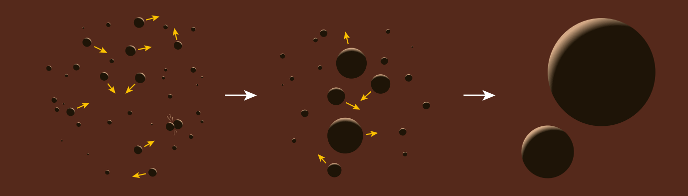
3 Die Beobachtungen passen jedoch nicht zu bisherigen Modellen der Planetenentstehung. Offenbar sind die dahinterliegenden physikalischen Prozesse komplexer als bisher angenommen.

Wie bildet sich ein Planet?

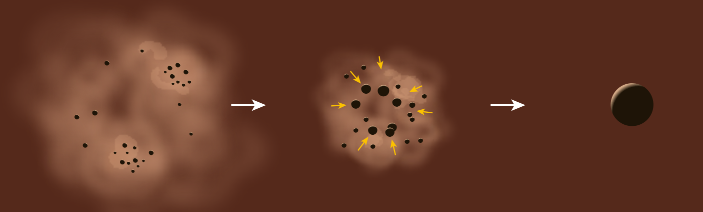
Es gibt zahlreiche unterschiedliche Theorien zur Entstehung von Planeten. Viele konzentrieren sich auf die Epoche unmittelbar nach der Geburt des Sterns, in der sich in der zunächst recht gleichförmigen Wolke aus Gas und Staub Planetenembryos bilden, so genannte Protoplaneten. Diese sind mehrere tausend Kilometer groß und können sich im Lauf der Zeit entweder zu Gesteinsplaneten oder zu Kernen großer Gasplaneten entwickeln.



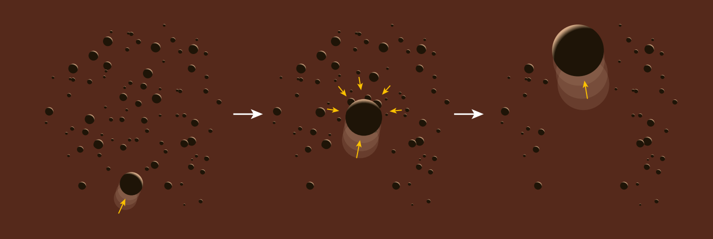
NATURE: BOYLE, R.: PICTURES OF WORLDS TO COME. NATURE 564, 2018 (10.1038/D41586-018-07591-8); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Kern-Akkretion
Dieser Theorie zufolge bilden sich Protoplaneten durch viele Zusammenstöße mit hoher Geschwindigkeit: Kleine Staubkörnchen formen sukzessive größere Objekte, die sich gegenseitig anziehen, kollidieren und häufig miteinander verschmelzen.



Strömungsinstabilität
Nach diesem Modell kollabieren Dichteschwankungen in der Wolke wegen der Schwerkraft zu asteroidengroßen Körpern, den Planetesimalen, die dann durch andere Prozesse weiter zu Planeten anwachsen.



Kieselstein-Akkretion
In diesem Szenario ziehen bereits vorhandene größere Körper bei ihrer Bewegung durch die Wolke kleinere Steine an. Mit der Zeit vereinen die Körper immer mehr Material auf sich und werden dadurch sehr groß – ähnlich wie ein rollender Schneeball.

jeweils vorhanden ist, stießen sie darauf, dass die Scheiben um Sterne mittlerer Größe viel leichter sind als erwartet.

Im Sommer 2018 griff der Astronom Carlo Manara von der Europäischen Südsternwarte ESO diese Ergebnisse auf und zeigte, dass der Befund überall in der Milchstraße zu gelten scheint: Protoplanetare Scheiben enthalten nur einen Bruchteil der Masse, die sich im Orbit ähnlicher Sterne sammelt. Demnach wären Planetensysteme also massereicher als die Gas- und Staubscheiben, aus denen sie entstanden sind.

Wie auch immer die Erklärung für diesen offensichtlichen Widerspruch lautet, die Theoretiker müssen mit den Folgen der Diskrepanz zurechtkommen. Um die beobachteten Exoplaneten zu erklären, beginnen die Forscher im Allgemeinen mit einer großen Menge an Materie. »Man benötigt viel Masse in der Scheibe, damit ihre Anziehungskraft gewissermaßen als Saat wirkt und so zu einem Kollaps führen kann«, sagt Greaves.

Es ist natürlich durchaus möglich, dass es dort mehr Materie gibt, als wir sehen. Die Scheibe könnte welche enthalten, die sich mit Teleskopen nur schwer aufspüren lässt. Eine andere Möglichkeit haben Manara und sein Kollege Alessandro Morbidelli vom Observatorium Côte d'Azur in Nizza vorgeschlagen: Vielleicht ziehen die Sterne weiteres Material aus Regionen außerhalb ihrer protoplanetaren Scheiben an, aus der Molekülwolke, in der sie entstanden sind. Ein solcher Zustrom wäre eigentlich nur schwer nachzuweisen. Doch 2017 veröffentlichte Beobachtungen des ESO-Astrophysikers Hsi-Wei Yen und seiner Kollegen zeigen zwei Gasströme, die mit der Scheibe von HL Tauri verbunden zu sein scheinen – wobei die Forscher jedoch nicht feststellen konnten, ob das Gas zur Scheibe strömt oder davon weg.

Wenn das Gas sich tatsächlich in Richtung des Sterns bewegen sollte, so Morbidelli, hätte das gravierende Konsequenzen. In diesem Fall würde es Temperatur, Dichte und Magnetfeld der Scheibe beeinflussen. Und vielleicht gilt das auch für andere Sterne. Somit wären etwaige Planeten bei ihrer Entstehung und ihrem Wachstum keineswegs von der weiteren Umgebung isoliert, was die Modelle der Astrophysiker jedoch nicht abbilden. »Das würde unser Verständnis



1. HL TAURI: ALMA (NRAO/ESO/NAOJ); C. BROGAN, B. SAXTON (NRAO/AUI/NSF) (PUBLIC.NRAO.EDU/NEWS/2013-10-01-13-11-51-2/) / CC BY 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/3.0/LEGALCODE);
2. IM LUPI: ESO/H. AVENHAUS ET AL./DARTT-S COLLABORATION (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESO1811C/) / CC BY 4.0;
3. HD 135344B: ESO, T. STOLKER ET AL. (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESO1640D/) / CC BY 4.0;
4. PDS 70: ESO/A. MÜLLER ET AL. (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESO1821A/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

von protoplanetaren Scheiben über den Haufen werfen«, sagt Morbidelli.

Als ob Theoretiker nicht bereits genug zu tun hätten, schießen Astronomen immer neue Bilder kosmischer Kreißsäle. Die jüngsten Entdeckungen unterstützen die Vermutung, dass Planeten sehr früh im Leben von Sternen entstehen – und in höchst unterschiedlichen Abständen. Dabei liefert nicht nur das chilenische Observatorium ALMA neue Aufnahmen. Für ihre Beobachtungen nutzen Forscher auch das Instrument SPHERE am Very Large Telescope der ESO.

Jagd nach zentimetergroßen Körnern

Es befindet sich ebenfalls in der Atacama-Wüste, etwa sechs Autostunden südlich von ALMA. SPHERE ist mit einem System ausgestattet, das den Einfluss der Atmosphäre korrigieren kann, die Aufnahmen unscharf macht. Auch blendet es das Licht des Sterns aus und ermöglicht so einen ungestörten Blick auf die umgebende Scheibe. Im April 2018 meldeten Astronomen, sie hätten mit SPHERE die Scheiben um acht junge, sonnenähnliche Sterne abgebildet. Einige davon ähneln großen Tellern, andere zeigen dunkle Spuren wie eine Rennbahn – und eine von ihnen sieht aus wie eine Galaxie, die zwei gewaltige Materiestrahlen ins All feuert. Die Experten sehen sich dadurch in der Vermutung bestätigt, dass die Entstehung von Planeten ein komplexer Prozess ist, der zu vielen Ergebnissen führen kann.

ALMA hat derweil möglicherweise den bislang jüngsten Exoplaneten entdeckt: Er umkreist einen gerade einmal vier Millionen Jahre alten Stern, der 330 Lichtjahre von der Erde entfernt ist. Das Observatorium kann die Planeten zwar nicht direkt sehen, aber die Verteilung von Kohlenmonoxid in der Scheibe ermitteln. Die Forscher wiesen darin Wirbel nach, die auf drei Planeten hindeuten, jeder ungefähr mit der Masse des Jupiters. Wie Felsbrocken in einem Bach beeinflussen diese Planeten die Gasströmung in der Scheibe.

SPHERE lieferte eine weitere Entdeckung. Astronomen haben das Instrument auf einen anderen jungen Stern gerichtet, genannt PDS 70, und ein direktes Bild eines großen Gasplaneten in seinem Orbit erhalten. Der Planet umkreist seinen Stern im vierfachen Abstand des Jupiters zur Sonne und sammelt immer noch Materie aus der Geburtsscheibe aus Gas und Staub ein. Möglicherweise ist er nicht allein: Im Juni 2019 spürten Forscher mit einem Schwesterinstrument namens MUSE Hinweise auf einen anderen Protoplaneten in dem System auf. Und noch ein anderes Messgerät hat unlängst Bilder von Scheiben mit entstehenden Planeten geliefert: der Gemini Planet Imager GPI am Gemini South Telescope im Vorgebirge der chilenischen Anden. Eine seiner Aufnahmen zeigt einen großen Gasplaneten, der gut zu den Vorhersagen des Kern-Akkretions-Modells passt.

Von oben nach unten: eine ALMA-Aufnahme, die durch Planeten erzeugte Lücken in der Scheibe um den jungen Stern HL Tauri zeigt; eine SPHERE-Aufnahme einer staubigen Scheibe um den Stern IM Lupi; ein Scheibe mit Spiralstruktur um den Stern HD 135344B; das Leuchten eines großen Gasplaneten in der Nähe des Sterns PDS 70.

Insgesamt mussten sich viele Astronomen jedoch damit abfinden, dass ihre theoretischen Arbeiten aus vergangenen Jahrzehnten nicht mehr gelten – und dass nicht klar ist, wie man die Mängel der Theorien beheben kann. »Natürlich bin ich etwas traurig, dass meine Arbeiten aus der Vergangenheit nicht die Wirklichkeit beschreiben«, sagt der Astronom Sean Raymon vom Astrophysikalischen Laboratorium in Bordeaux. Aber so sei das eben mit Modellen: Sie spiegeln die Realität nie eins zu eins wider. »Dennoch sind sie ein Schritt vorwärts – hoffentlich.«

Letztlich könnten Beobachtungen mit heutigen Teleskopen nicht ausreichen, um das Rätsel zu lösen. ALMA und andere Radioteleskope können zwar den Staub und das Gas in der Umgebung junger Sterne sehen. Und mit optischen Instrumenten wie SPHERE und GPI lassen sich die Scheiben und die darin eingebetteten Planeten abbilden. Doch der ganze Bereich zwischen den winzigen Staubkörnchen und 1000 Kilometer großen Körpern bleibt unsichtbar. Vielleicht können künftige Observatorien die Lücke zwischen Staub und Protoplaneten zumindest teilweise überbrücken. Fachleute hoffen hier unter anderem auf hochauflösende Radiobeobachtungen am Merlin Array in Großbritannien sowie am künftigen Square Kilometer Array in Südafrika und Westaustralien.

Die Forscher hoffen, auf diese Weise zentimetergroßes Material in den Scheiben aufzuspüren, aus dem sich Planeten bilden könnten. »Wenn wir einen Fleck in einer Scheibe sehen, der auf die Entstehung eines erdähnlichen Planeten in einem ähnlichen Abstand wie jenem der Erde von der Sonne hindeutet – das wäre der heilige Gral, zumindest für mich«, findet Greaves.

Die Beobachtung protoplanetarer Scheiben steckt somit noch in den Kinderschuhen, und die vollständige Geschichte der Planetenentstehung ist wohl komplizierter, als Wissenschaftler lange vermuteten. Ideen und Theorien könnten also immer wieder über den Haufen geworfen werden. »Unser Sonnensystem scheint jedenfalls kein typisches Beispiel für die Planetensysteme da draußen zu sein«, sagt Clement. »Unsere Heimat tanzt ein wenig aus der Reihe.« ◂

QUELLEN

ALMA Partnership: The 2014 ALMA long baseline campaign: first results from high angular resolution observations toward the HL Tau region. The Astrophysical Journal Letters 808, 2015

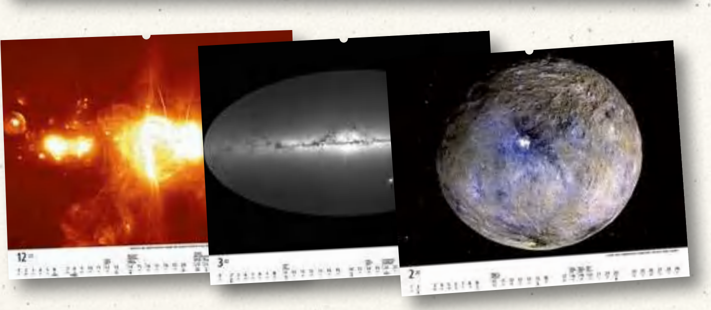
Avenhaus, H. et al.: Disks around T Tauri stars with SPHERE (DARTTS-S). I. SPHERE/IRDIS polarimetric imaging of eight prominent T Tauri disks. Astrophysical Journal 863, 2018

Keppler, M. et al.: Discovery of a planetary-mass companion within the gap of the transition disk around PDS 70. Astronomy & Astrophysics 617, 2018

nature
© Springer Nature Limited
www.nature.com

Nature 564, S. 20–23, 2019





STERNE UND WELTRAUM

DER NEUE BILDKALENDER
HIMMEL UND ERDE 2020

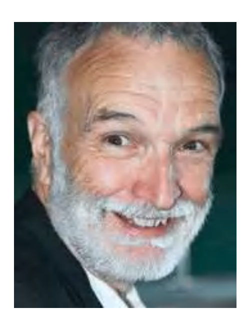
Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Die Aufnahmen zeigen das Milchstraßenzentrum, den Kometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko, die Magellansche Wolke, die Marsoberfläche, den Saturn und weitere Himmelsregionen und -objekte. Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2020 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte.

14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung;
Format: 55 x 46 cm; € 29,95 zzgl. Porto;
als Standing Order € 27,– inkl. Inlandsversand

HIER KÖNNEN SIE BESTELLEN:
Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/aktion/hue
E-Mail: service@spektrum.de



SCHLICHTING!
WASSERWALL IN DER SPÜLE



Wenn ein Wasserstrahl auf eine ebene Fläche trifft, bildet sich ringsum eine dünne, kreisförmige Schicht, die sich in etwas Abstand plötzlich zu einem Flüssigkeitswall auftürmt.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

⏩ spektrum.de/artikel/1669398

Durch eine Bewegung oder einen Sprung kann Wasser sich erheben
Leonardo da Vinci (1452–1519)

Dreht man den Wasserhahn über einer Spüle vorsichtig auf – der Strahl sollte kompakt, aber nicht zu kräftig sein –, beobachtet man eine scheinbar wasserfreie, nahezu kreisrunde Fläche um die Auftreffstelle. Sie entpuppt sich als sehr dünner und glatter Strom, der radial nach außen strebt. In einem bestimmten Abstand türmt er sich unvermittelt wesentlich höher auf. Von dort fließt das Wasser dann langsam weiter in den Ausfluss.

Das Küchenphänomen ist allgegenwärtig und wird dennoch meist nicht bewusst wahrgenommen. Es ist ein Spezialfall eines so genannten hydraulischen Sprungs oder Wechselsprungs und kommt bei Flüssigkeiten in ganz unterschiedlichen Ausprägungen vor. Der kreisförmige oder zirkuläre hydraulische Sprung ist seit Jahren Gegenstand der Forschung, und Physiker finden immer wieder neue Aspekte. Unter gewissen Voraussetzungen kann sich beispielsweise die runde Form auflösen und zu einem Polygon werden, also regelrechte Ecken ausbilden.

Die Entstehung der Kreisstruktur ist für sich bereits erstaunlich genug. Schon einfache Experimente in der Spüle enthüllen: Der Wasserkreis ist äußerst stabil. Nach jeder noch so starken Störung bildet er sich sofort aufs Neue. Abweichungen von einem idealen Kreis gibt es nur wegen Inhomogenitäten im Strahl und Unebenheiten in der Oberfläche der Spüle. Dreht man den Wasserhahn weiter auf oder zu, wächst oder schrumpft der Radius.

Wer das Geschehen genauer untersuchen will, kann beispielsweise in einer kleinen Wanne mit einer Pumpe, einem Schlauch und einer horizontal ausgerichteten Glasscheibe einen kontinuierlichen Kreislauf aufbauen. So bekommt man eine nahezu perfekte Form. Die Auswirkungen der aufgestauten Flüssigkeit auf das Geschehen lassen sich mit einer höhenverstellbaren, ringförmigen Barriere in einigem Abstand vom hydraulischen Sprung analysieren.

Was steckt hinter dem Phänomen? Der Strahl, also ein kompakter, in vertikaler Richtung strömender Flüssigkeitszylinder, schießt nach dem Auftreffen auf den Boden symmetrisch nach allen Seiten. Dabei wird er zu einer dünnen Scheibe, in der das Wasser radial wegfließt. Beim Aufprall vergrößert sich dessen Grenzfläche zur umgebenden Luft enorm. Außerdem entsteht eine neue Grenzfläche zwischen der Flüssigkeit und dem Untergrund. Für beides ist eine Menge Energie nötig (siehe »Winzige Tröpfchen ganz groß«, **Spektrum** Juli 2018, S. 64). Sie kann nur aus der ursprünglichen Bewegungsenergie des fallenden Wassers stammen.

Die Grenzfläche mit der Luft und dem Untergrund wächst quadratisch mit dem Radius des Kreises. Die Flüssigkeitsschicht wird also mit zunehmender Entfernung vom Auftreffpunkt des Strahls nicht nur immer dünner auseinandergezogen, sondern vor allem nehmen ihre Bewegungsenergie und damit die Geschwindigkeit rapide ab. Hinzu kommt die innere Reibung der strömenden Flüssigkeit auf Grund ihrer Zähigkeit (Viskosität). Auch sie muss überwunden werden, was ebenfalls zu Lasten der kinetischen Energie geht.

Wasser, das schneller schießt als sein Schatten

Physiker bezeichnen die sich ungewöhnlich rasch radial ausbreitende Flüssigkeit auch als schießend: Sie ist schneller, als sich Wellen und damit jede Form einer Störung auf der Oberfläche ausbreiten können. Das bedeutet, dass die Grenzflächen sich nicht ein für alle Mal ausbilden und das Wasser gewissermaßen umhüllen – wie bei einem fallenden Tropfen oder einer Seifenblase –, sondern fortwährend neu entstehen. Dafür ist ständig Energie nötig.



DEEPBLUE4YOU / GETTY IMAGES / ISTOCK

Bei einem hydraulischen Sprung prallt Wasser auf eine Oberfläche (etwa ein Spülbecken, links), breitet sich dort in einem dünnen Film zu den Seiten hin aus und wird dabei abgebremst. Ist die Geschwindigkeit gering genug, entstehen Wirbel – und die Flüssigkeit wölbt sich plötzlich auf (unten).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: H. JOACHIM SCHLICHTING

Weil ihre Bewegungsenergie mit zunehmendem Radius aufgebraucht wird, müsste die schießende Flüssigkeit anschaulich gesprochen irgendwann stehen bleiben. Das tut sie auch – sie staut sich auf. Die größere Höhe des Walls kompensiert dann seine kleinere Geschwindigkeit. Es stellt sich ein Fließgleichgewicht ein, bei dem genauso viel Volumen nach außen abfließt, wie von innen nachgeliefert wird.

Der Radius des Übergangs hängt von der Auftreffgeschwindigkeit ab und ist bei sonst unveränderten Bedingungen immer gleich, unabhängig davon, wie die Fläche im Raum orientiert ist. Ob der Strom von oben, von unten oder waagrecht aufprallt, macht also kaum einen Unterschied, solange er dabei gleich schnell ist. Die Schwerkraft spielt beim kreisförmigen hydraulischen Sprung im Allgemeinen praktisch keine Rolle.

Dort, wo die schießende Flüssigkeit zum Stillstand kommt und sich auftürmt, wird der Strom im unteren Bereich der Schicht unmittelbar über dem Grund am stärksten abgebremst. Nachlaufende Flüssigkeit stolpert gewissermaßen darüber, kippt nach vorn und läuft teilweise entgegen der allgemeinen Bewegungsrichtung zurück. Es bildet sich ein Wirbel beziehungsweise ein Schlauch von Wirbeln, der sich im gleichen Radius rund um die Kreismitte legt (1. Wirbel, Illustration oben). Hier steigt das Wasser nach oben.

Wird der Abfluss nach dem Sprung zusätzlich durch eine Barriere behindert, so staut sich das Wasser jenseits des Sprungs weiter auf. Die Sprungkante wird schließlich unterströmt und kippt – auf diese Weise instabil geworden – entgegen der allgemeinen Strömungsrichtung nach hinten über. So entsteht ein neuer stationärer Zustand mit einem zweiten Wirbel. Er hat die umgekehrte Drehrichtung und befindet sich direkt unter der Oberfläche an der Stirnseite des Walls (2. Wirbel, Illustration oben). Nachkommende Flüssigkeit strömt im Slalom zwischen den Wirbeln hindurch und treibt dadurch beide an.

Die Figur ist nicht immer stabil. Die Kreisform kann durch kleinste Störungen zerfallen und Ecken bilden. Diese dominieren dann das Geschehen und sind zunächst unregelmäßig und unbeständig. Durch sorgfältige Variationen der wesentlichen Parameter, insbesondere der Viskosität, lassen sich die so entstandenen Ecken jedoch stabilisieren: als regelmäßige und dauerhafte Vielecke sowie ästhetisch ansprechende andere Formen.

Eine umfassende Erklärung dafür steht allerdings noch aus. Die Physiker sind sich immerhin einig, dass der zweite, obere Wirbel für den Symmetriebruch der Kreisform entscheidend ist. Der Vorgang, bei dem sich der Torus an der Sprungkante in einzelne Teilströme separiert, kann als Analogon zur so genannten Rayleigh-Plateau-Instabilität angesehen werden. Hinter dem Begriff steht ein Effekt, der sich ebenfalls an dem Wasserhahn einer Spüle beobachten lässt: der Zerfall eines dünnen, langen Wasserstrahls in einzelne Tropfen. Ein Phänomen kommt schließlich selten allein.

Stellt man entscheidende Parameter wie die Zähigkeit der Flüssigkeit richtig ein, zerfällt der Ring sogar in eckige Muster.



INSTITUT FÜR DIDAKTIK DER PHYSIK (IDP) UNIVERSITÄT MÜNSTER; MIT FRDL. GEN. VON H. JOACHIM SCHLICHTING

QUELLE

Bhagat, R.K. et al.: On the origin of the circular hydraulic jump in a thin liquid film. Journal of Fluid Mechanics 851, 2018

INTERVIEW

DIE STRINGTHEORIE UND DIE REALE WELT

Eine neue Debatte bringt Bewegung in die Suche nach der Weltformel: Die Stringtheorie könnte im Widerspruch zu unserem kosmologischen Weltbild stehen. Der Heidelberger Physiker Arthur Hebecker erklärt, was auf dem Spiel steht.

spektrum.de/artikel/1669400

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Hebecker, seit mehr als 15 Jahren forschen Sie auf dem Gebiet der Stringtheorie. Was fasziniert Sie so sehr daran?
Arthur Hebecker: Sie ist ein in sich konsistentes Modell für das, was wir eine Theorie der Quantengravitation nennen, also für eine Zusammenführung von Teilchenphysik und Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Die Stringtheorie ist hier meiner Meinung nach ein besonders gut verstandener Ansatz, mit dem man sehr viel ausrechnen kann. Darüber hinaus hat sie eine ganze Reihe von interessanten Implikationen für die reale Welt.

Zum Beispiel?
Aus der Stringtheorie lassen sich Vorhersagen ableiten, die man – im Prinzip zumindest – mit Messungen überprüfen kann. Wenn wir Glück haben, gilt das auch für den Bereich des Mikrokosmos, den wir Physiker mit Teilchenbeschleunigern erforschen. Hier dringt man zu immer kleineren Abständen zwischen subatomaren Teilchen vor und erforscht, welche Naturgesetze dort gelten. Dass hier die Stringtheorie wichtig werden könnte, war ein großes Thema, als ich Anfang der 2000er Jahre in das Gebiet eingestiegen bin.

Was war damals los?
Viele meiner Kollegen haben sich für die Möglichkeit zusätzlicher Raumzeitdimensionen interessiert. In unserer Alltagswelt wären diese nicht sichtbar. Aber damals sah es so aus, als könnten sie einen messbaren Einfluss auf energiereiche Teilchenkollisionen am Large Hadron Collider (LHC) bei Genf haben, der zu dieser Zeit gebaut wurde und 2009 mit den Messungen begonnen hat.

Wie hängen die Extradimensionen mit der Stringtheorie zusammen?
Der Theorie zufolge besteht das Universum auf einer elementaren Ebene aus eindimensionalen Fäden, die sich in der Zeit bewegen. Auf den ersten Blick kann man mit diesen Strings auf sehr natürliche Weise eine Welt konstruieren, in der es einerseits eine Schwerkraft gibt und andererseits Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen mit quantisierten Ladungen. Bei genauerem Hinsehen ergeben sich jedoch mathematische Widersprüche, wenn sich die Strings in der uns vertrauten Raumzeit mit drei Raum- und einer Zeitdimension bewegen. Das gilt auch für fünf-, sechs-, sieben-, acht- und neundimensionale Raumzeiten. Bettet man die Fäden hingegen in eine zehndimensionale Welt ein, verschwinden die Probleme.

Müsste das theoretische Physiker nicht eigentlich abschrecken? Etwas funktioniert nicht in der uns vertrauten Welt, also versuchen wir es in einem höherdimensionalen Raum?
Natürlich könnte man sagen: Das Ganze ist nur ein nettes Spielzeug und hat sonst keine Bedeutung. Andererseits ist es wirklich beeindruckend, wie weit man diesen Gedanken in den vergangenen Jahrzehnten entwickeln konnte. Es drängt sich daher aus meiner Sicht die Frage auf, ob das Ganze nicht trotz der Extradimensionen etwas mit unserer Realität zu tun haben kann. Ist es wirklich ein Zufall, dass sich in zehn Dimensionen mit Strings etwas mathematisch so Sinnvolles und noch dazu Elegantes anstellen lässt?

Wo würden sich die Extradimensionen denn verstecken?
Sie wären »aufgerollt« und würden daher nur mikroskopisch kleine Räume aufspannen, anders als die drei uns vertrauten Raumdimensionen. Diese sind unendlich ausgedehnt, Elementarteilchen haben darin unbegrenzt viel Platz. Die Extradimensionen hingegen könnten wir nur bemerken, wenn wir ganz genau hinsehen. Die bekannten subatomaren Partikel würden in sie eindringen und einen Teil ihres Impulses dorthin tragen. Das würde zu neuen Anregungszuständen führen, die wir an Teilchenbeschleunigern nachweisen könnten.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / PHILIPP ROTHE

Arthur Hebecker

wurde 1968 in Moskau geboren. Nach dem Abitur in Leipzig und dem Physikstudium in Moskau, Frankfurt am Main und München promovierte er in Hamburg mit Arbeiten am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY). Im Anschluss an Forschungsaufenthalte am Stanford Linear Accelerator Center, der University of Cambridge, in Heidelberg und am CERN wurde er wissenschaftlicher Angestellter am DESY. Seit 2004 ist er Professor für theoretische Teilchenphysik in Heidelberg. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Physik jenseits des Standardmodells sowie die Kosmologie, insbesondere die kosmologische Inflation.

Am LHC sind bis heute allerdings keinerlei Hinweise dafür aufgetaucht. Hat die Stringtheorie dadurch an Reiz verloren?

Wir wissen schlicht nicht, wie groß die Extradimensionen wären. Wenn sie sehr klein sind, beispielsweise nicht viel größer als die so genannte Planck-Skala bei 10^{-35} Metern, können wir sie mit irdischen Teilchenbeschleunigern nicht nachweisen. Generell ist mit Blick auf die Suche noch nicht aller Tage Abend. Die Messungen am LHC laufen noch, und hoffentlich wird es in Zukunft noch mächtigere Maschinen geben. Hinweise auf Extradimensionen könnten also durchaus noch auftauchen.

Trotz fehlender empirischer Belege ist die Stringtheorie über die Jahre immer komplexer geworden. Physiker vermuten beispielsweise, dass auch »Branen« eine wichtige Rolle spielen. Es soll sich dabei um sechsdimensionale Membranen handeln, zwischen denen die Strings verlaufen. Man kann bei solchen Ideen den Eindruck gewinnen, dass mit der Stringtheorie ein ziemlich opulentes Luftschloss ohne Bezug zur Realität geschaffen wurde.

Für Außenstehende mag es so wirken, als hätten wir Physiker die Theorie einfach immer barocker gemacht. Aber das stimmt nicht, zumindest nicht in dem Sinne, dass man immer neue Bausteine dazugenommen hat. Das ist ein wichtiger Punkt, der zugegebenermaßen schwer zu verstehen ist: Die Stringtheorie ist eine in sich geschlossene, im Prinzip eindeutige Theorie. Statt sie beliebig mit weiteren Elementen zu verzieren, haben wir schlicht mehr und mehr über die Implikationen des String-Gedankens gelernt.

Was meinen Sie konkret?

Wenn man einmal die Idee hat, einen Superstring – so bezeichnen wir einen String, der sich in einer Raumzeit bewegt und der eine Eigenschaft hat, die wir »supersymmetrisch« nennen – zu quantisieren, dann landet man bei dieser einen Theorie. Was man dann als Vielfalt wahrnehmen kann, sind ihre vielen Facetten. Eine Parallele zur Materialwissenschaft hilft, einen Teil der Komplexität zu verstehen: So ähnlich wie Eisen je nach Vorgeschichte magnetisiert und nichtmagnetisiert sein kann, gibt es auch bei der Stringtheorie verschiedene Phasen. Wir nennen diese beispielsweise »II A«, »II B« oder »heterotisch«. Das sieht wie eine Klassifizierung verschiedener Möglichkeiten aus, es handelt sich nach unserem Verständnis jedoch bloß um verschiedene rechenbare Bereiche der gleichen fundamentalen Theorie.

Das ist das, was Ihr Kollege Edward Witten in den 1990er Jahren entdeckt hat: dass die fünf damals bekannten Varianten der zehndimensionalen Stringtheorie in Wahrheit Facetten ein und derselben elfdimensionalen Theorie sind, der »M-Theorie«. Gibt es hierzu eigentlich einen mathematischen Beweis?

»Beweisen« ist in diesem Zusammenhang ein schwieriges Wort. Vieles, was Teilchenphysiker ohne Weiteres hinnehmen, ist streng mathematisch nicht bewiesen, selbst die Existenz einer einfachen Quantenfeldtheorie. Ich würde aber sagen, es steht außer Frage, dass die Stringtheorie als Theorie der Quantengravitation in zehn Dimensionen zu keinen inneren Widersprüchen führt. Auch andere Dinge sind aus meiner Sicht über jeden Zweifel erhaben, zum Beispiel die so genannten T-Dualitäten zwischen verschiedenen Stringtheorien: Eine Theorie auf einem kleinen Kreis aufgerollt ist das Gleiche wie eine andere Theorie auf einem großen Kreis aufgerollt. Dies ist einer der einfachsten Bausteine in einem Netz von Dualitäten, das Theoretiker in den 1990er Jahren gefunden haben.

Und welche Aussagen der Theorie sind weniger gut gesichert?

Die Geometrien der Extradimensionen sind vermutlich viel komplizierter als die eines Kreises. Und je näher man solchen Lösungen kommt, desto schwieriger wird es mit

mathematischen Beweisen irgendeiner Dualität. Was in jedem Fall noch nicht bewiesen ist, ist die Vollständigkeit der Theorie. Es kann gut sein, dass sie noch viel mehr Ecken und Facetten hat, als wir im Moment überblicken. Und vielleicht haben diese mehr mit der realen Welt zu tun als die, mit denen wir zurzeit rechnen können.

Können Menschen denn überhaupt in mehr als drei Dimensionen denken?

Das Ganze hat natürlich Grenzen. Aber zum Glück gibt es die Mathematik. Wir gehen davon aus, dass sich die sechs zusätzlichen, »kompaktifizierten« Raumdimensionen durch so genannte Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten beschreiben lassen. Das sind sechsdimensionale Räume mit sehr komplizierter Geometrie. Sie enthalten viele Untermannigfaltigkeiten, die sich nicht auf einen Punkt zusammenziehen lassen. Bei mir ist da die Vorstellung am Ende, aber man kann mathematische Methoden anwenden.

Muss man die Stringtheorie im Detail verstehen, um ihren Zauber zu begreifen?

Man muss tatsächlich Arbeit investieren, um die Eleganz der Theorie würdigen zu können. Ich bereue es im Nachhinein fast etwas, dass ich mich nicht sofort als Doktorand damit befasst habe, sondern mich bis Mitte 30 eher allgemeinen Problemen aus der Teilchenphysik gewidmet habe. Nicht, weil ich die Erfahrung mit angewandten Themen falsch finde. Sondern weil man in jungen Jahren Sachen leichter lernt.

Als junger Mensch ist man auch leichter zu beeindrucken. Lässt man sich dadurch eher von mathematischer Schönheit blenden?

Ich denke in der Tat, dass man in dieser Hinsicht vorsichtig sein sollte. Man kann sich von Eleganz verführen lassen und sich mit etwas nur um der Ästhetik willen beschäftigen. Ich glaube nicht, dass ich persönlich das tue. Als Physiker interessiere ich mich in erster Linie für die reale Welt. Die Stringtheorie könnte bei ihrer mathematischen Beschreibung helfen – deswegen arbeite ich damit. Generell würde ich jedem jungen Theoretiker und jeder jungen Theoretikerin empfehlen, ein oder zwei Semester lang eine Vorlesung dazu zu besuchen. Wenn er oder sie dann zu dem Ergebnis kommt, dass die Theorie zu abgehoben ist, finde ich das vollkommen legitim. Aber man begegnet leider auch dem anderen, aus meiner Sicht nicht legitimen Standpunkt: Das ist mir zu kompliziert, und das hat deshalb gar nichts mit der Realität zu tun.

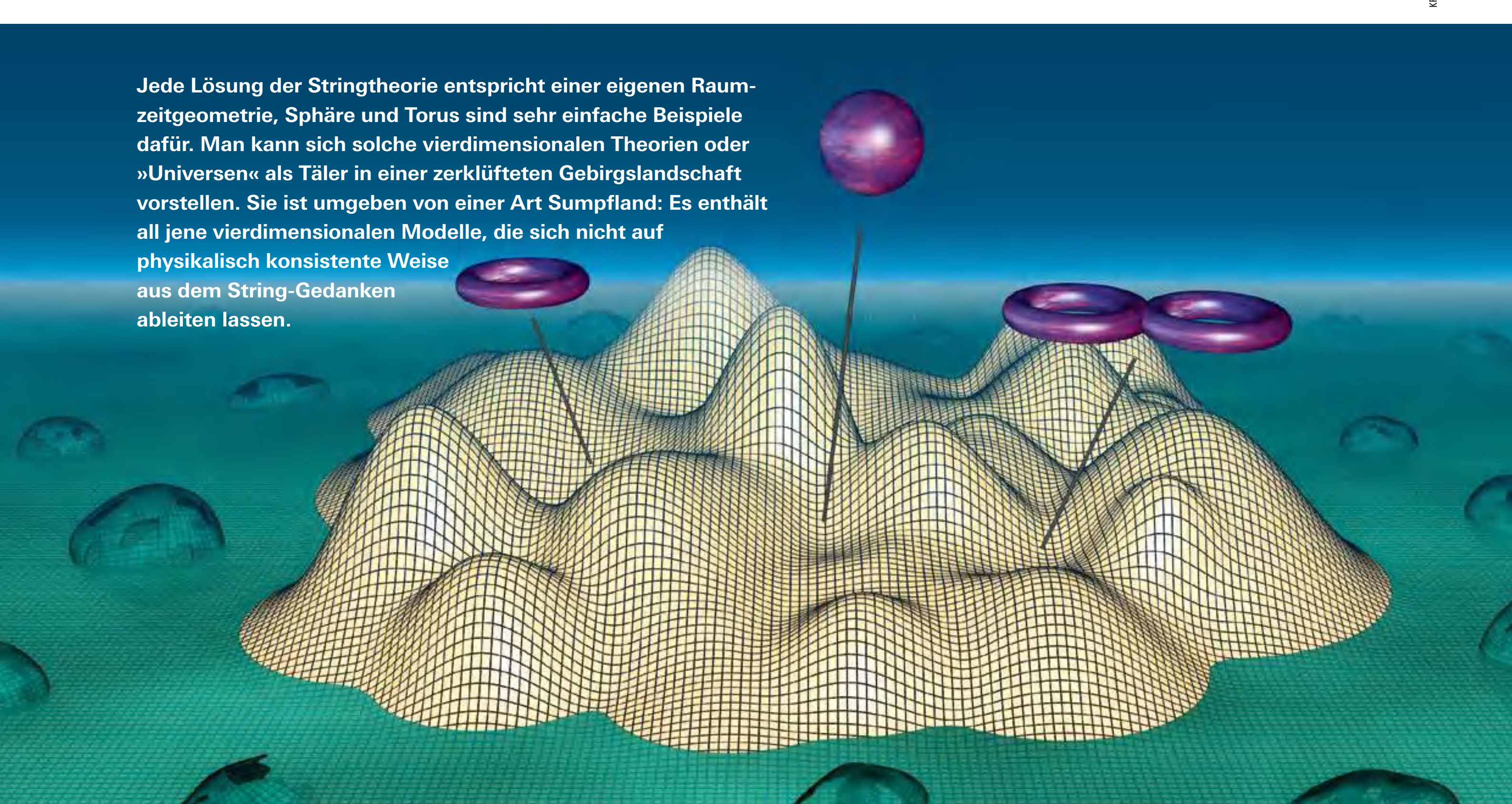
Bei Menschen, die sich für Physik interessieren, polarisiert die Stringtheorie mitunter stark. Sie ist von einigen Physikern wiederholt öffentlichkeitswirksam angegriffen worden. Wie erklären Sie sich das?

Ich sehe hier zwei Gründe. Zum einen ist da eine gewisse Vormachtstellung, welche die Theorie in der theoretischen Physik erlangt hat. Sie hat einfach die meisten Forscher hinter sich, darunter einige große Namen. Unter anderem in den USA ist sie dadurch recht dominant. Das weckt natürlich Kritik, der ich zum Teil Recht geben würde. Solange die Stringtheorie nicht bestätigt ist, sollte man auch andere Wege zur Quantengravitation ausloten und verfolgen. Oder anders ausgedrückt: Wissenschaft sollte nicht ausschließlich etwas mit Mehrheiten zu tun haben. Es gibt in der Vergangenheit viele Beispiele, wo sich eine Mehrheit geirrt hat und sich im Nachhinein die Arbeit von ganz wenigen Leuten als die richtige herausgestellt hat.

Was ist Ihrer Meinung nach der andere Grund für die Ablehnung?

Er hat mit einer Entwicklung aus den frühen 2000er Jahren zu tun, als ich gerade in das Feld eingestiegen war. Da-

KRISTIN RIEBE



Jede Lösung der Stringtheorie entspricht einer eigenen Raumzeitgeometrie, Sphäre und Torus sind sehr einfache Beispiele dafür. Man kann sich solche vierdimensionalen Theorien oder »Universen« als Täler in einer zerklüfteten Gebirgslandschaft vorstellen. Sie ist umgeben von einer Art Sumpfland: Es enthält all jene vierdimensionalen Modelle, die sich nicht auf physikalisch konsistente Weise aus dem String-Gedanken ableiten lassen.

»Das würde auf eine neue kopernikanische Wende hinauslaufen«

mals entwickelten Kollegen die Idee der Stringtheorie-»Landscape« oder »Landschaft«. Sie läuft auf eine revolutionäre Sichtweise auf den Kosmos hinaus. Je nachdem, wie man die sechs Extradimensionen aufrollt, ergeben sich verschiedene vierdimensionale Welten. Diese haben jeweils ganz eigene Naturgesetze. Es könnte also unzählige andere Universen geben, die sich jedoch deutlich von unserem unterscheiden. Wir würden demnach in einer Art »Multiversum« leben.

Um genau zu sein, sollen 10^{500} solcher Welten mit der Stringtheorie kompatibel sein, eine Zahl mit 500 Nullen …
Es könnten sogar noch weit mehr sein. Es gibt neuere Berechnungen, die bei $10^{300\,000}$ Möglichkeiten landen. Wie auch immer: Es ist schwierig, sich damit abzufinden, dass unsere Teilchenphysik vielleicht nicht die einzig mögliche sein könnte. Das verursacht das Gefühl einer gewissen Beliebigkeit, und es würde auf eine neue kopernikanische Wende hinauslaufen. Gleichzeitig ist die Hoffnung, etwas davon experimentell nachzuweisen, nicht allzu groß. Ich bin niemandem böse, der aus diesen Gründen die Stringtheorie ablehnt.

Aber ist das nicht ein berechtigter Einwand? Sagt nicht eine Theorie, die letztlich alles vorhersagen kann, nichts voraus?
Diese Möglichkeiten oder »Vakua« sind verschiedene Lösungen einer eindeutigen Theorie – das ist zumindest unsere Auffassung. Dass eine Theorie unglaublich viele Lösungen hat, kann man ihr kaum zum Vorwurf machen, oder? Denken Sie einmal an folgende Analogie: Mit der Quantenmechanik und den Atomen von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff können Sie signifikante Teile der uns bekannten Chemie nachbauen, unzählige verschiedene Moleküle. Niemand würde der Quantenmechanik oder der Chemie deshalb vorwerfen, keine richtigen Theorien zu sein, bloß weil sie so viele verschiedene Lösungen haben.

Ein anderer Vorwurf ist, dass die Stringtheorie keine testbaren Vorhersagen macht.
Ja, es könnte schwer sein, sie zu testen. Ich würde lügen, wenn ich sagte, dass mir das keine Sorgen bereitet. Andererseits könnte die Theorie trotzdem wahr sein. Dass man sie per se nicht testen kann, stimmt übrigens nicht. Wenn man einen riesigen Teilchenbeschleuniger bauen und dort Partikel mit gewaltigen Energien kollidieren ließe, würde man sehen, ob das Universum aus vibrierenden Strings besteht.

Mit heutiger Technologie müsste solch ein Teilchenbeschleuniger die Größe unserer Galaxie annehmen, heißt es immer wieder. Ist das die einzige Möglichkeit für einen Test?
Es könnte auch in absehbarer Zeit überprüfbare Vorhersagen geben. Vielleicht sind die Extradimensionen doch gar nicht viel kleiner als das, was wir momentan mit dem LHC beobachten können. Eine andere Möglichkeit ist der Blick ins Weltall: Manche Modelle für die kosmologische Inflation, bei der sich das Weltall in den Sekundenbruchteilen nach dem Urknall enorm schnell ausdehnte, machen auf Basis der Stringtheorie sehr konkrete Vorhersagen. Wenn es die Natur gut mit uns meint, könnte man solche Indizien entdecken. Allerdings sind diese Spuren dann vermutlich nicht eindeutig, beziehungsweise sie würden nicht zwingend die Existenz von Strings erfordern.

Im schlimmsten Fall würden definitive Beweise also erst auf der Planck-Skala bei 10^{-35} Metern auftauchen?
Ja, oder zumindest in der Nähe. Aber wir könnten, wie gesagt, Glück haben. Und man kann natürlich nach Wegen suchen, die das etwas wahrscheinlicher machen. Viele Kollegen versuchen seit Langem, Phänomene, die wir messen können, in Verbindung mit der Stringtheorie zu bringen. Eine konkrete Idee, die in letzter Zeit auf großes Interesse gestoßen ist, besteht darin, Dinge zu finden, die auf Basis der Stringtheorie unmöglich sind. Wenn wir diese dann messen sollten, wäre das ein Argument gegen die Stringtheorie. Das wäre also eine neue Möglichkeit, sie zu testen.

Wie kam man auf diese Strategie?
Vor fünf Jahren gab es eine rege Diskussion darüber, ob man in der kosmischen Hintergrundstrahlung die Spuren von Gravitationswellen des Urknalls gemessen hat. Einige meiner Kollegen haben damals argumentiert, dass es sehr schwierig sein könnte, solche Signale mit der Stringtheorie in Einklang zu bringen. Dadurch hat dann eine alte Idee Auftrieb erhalten: gezielt nach möglichen Lösungen zu suchen, die zwar auf den ersten Blick unserer vierdimensionalen Welt ähneln, aber auf Grund von inhärenten mathematischen Widersprüchen nicht existieren können. Wir bezeichnen diese Möglichkeiten in Abgrenzung zur String-Landscape als »Swampland«, zu Deutsch in etwa »Sumpfland«.

Ich habe gelesen, dass schon die Entdeckung der Dunklen Energie im Jahre 1998 als Herausforderung für die Stringtheorie galt. Die Dunkle Energie wirkt der Schwerkraft zwischen Galaxien entgegen und beschleunigt die Expansion des Alls. Nach Einschätzung vieler Forscher ist ihre Dichte zeitlich konstant, sie taucht daher in den einsteinschen Feldgleichungen für den gesamten Kosmos als »kosmologische Konstante« auf. Das würde vermutlich bedeuten, dass die Raumzeit auf ganz großen Skalen positiv gekrümmt ist; Experten sprechen von einem De-Sitter-Universum. Können

Sie uns erklären, wieso das ein Problem für die Stringtheorie ist?

Das hat vor allem mit der so genannten Supersymmetrie zu tun, die eine wichtige Basis für Lösungen der Stringtheorie ist. Wenn man damit De-Sitter-Universen realisiert, muss man die Supersymmetrie »brechen«, und es setzt leicht das ein, was wir Dekompaktifizierung nennen: Die jeweilige konstruierte vierdimensionale Welt geht unter, weil die kleinen Extradimensionen wieder groß werden. In negativ gekrümmten Welten – wir sprechen von »Anti-de-Sitter-Universen« – taucht dieses Problem nicht so leicht auf.

2003 haben Ihre Kollegen Shamit Kachru, Renata Kallosh, Andrei Linde, Sandip P. Trivedi jedoch einen Weg gefunden, positiv gekrümmte De-Sitter-Universen aus der Stringtheorie herzuleiten, richtig?

Ja, sie haben das erste Modell mit positiver kosmologischer Konstante gefunden. Es lässt sich mit so genannten Anti-D-Branen, Instantonen und anderen exotischen Zutaten konstruieren. Mittlerweile gibt es auch vergleichbare Modelle, aber »KKLT« gehört nach wie vor zu den einfachsten und am besten verstandenen. Insofern war es ein großer Fortschritt und hat tatsächlich wesentlich zu der dann einsetzenden Begeisterung für das Multiversum beigetragen.

Die KKLT-Vermutung wurde über die Jahre immer wieder kritisch hinterfragt, manche Ihrer Kollegen haben nach wie vor Zweifel an ihr.

Ich würde sagen, dass KKLT bis heute alle Angriffe überstanden hat. Ich habe auch selbst gerade zwei Arbeiten mitveröffentlicht, die das Modell verteidigen. Aber ja, es gibt offene Enden, die wir gerne abbinden würden. Zum Beispiel stand die Stabilität der Anti-D-Branen, die man da einführt, zuletzt sehr in der Kritik. Vieles davon ist aus meiner Sicht mittlerweile vom Tisch, aber ein wirklich perfektes Verständnis der Sache haben wir noch nicht.

Die Diskussion hat 2018 Fahrt aufgenommen. Da hat Ihr renommierter Kollege Cumrum Vafa von der Harvard University gemeinsam mit Georges Obied, Hirosi Ooguri und Lev Spodyneiko die Fachwelt mit einer Pauschalaussage überrascht: Es könne in der Stringtheorie überhaupt keine De-Sitter-Universen geben.

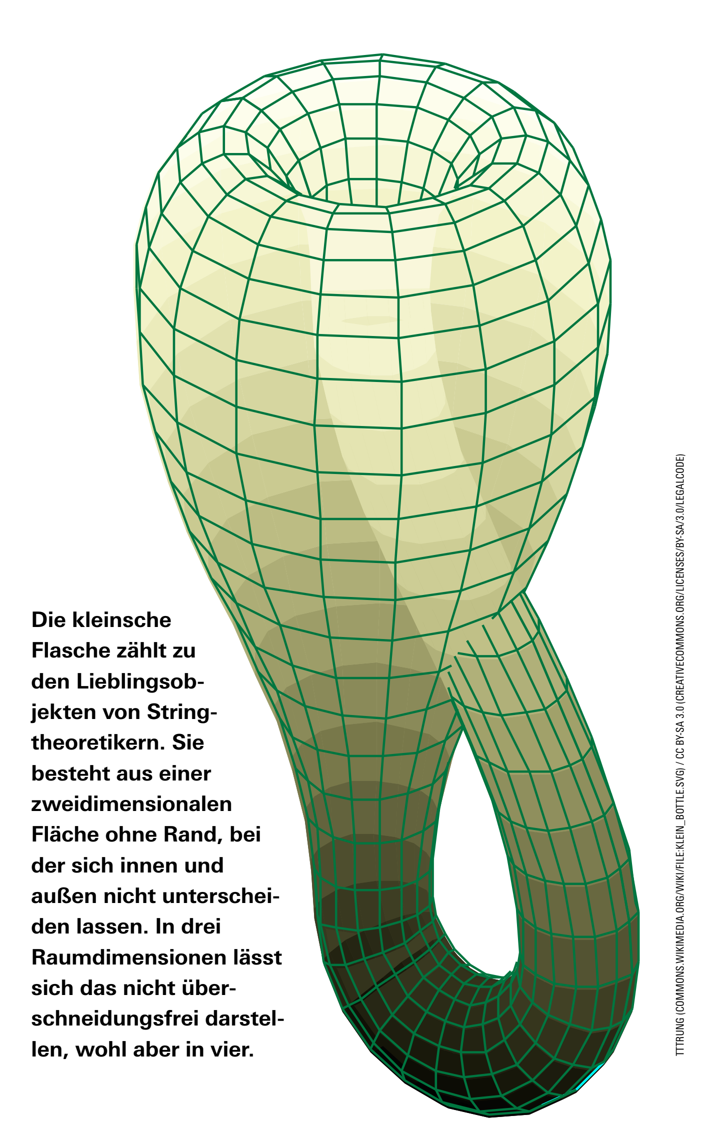
Ja, dieser Vorstoß hat für viel Wirbel gesorgt, insbesondere wegen Vafas Beteiligung: Er hat in der Vergangenheit wesentliche Beiträge geleistet und dabei zuweilen große Weitsicht bewiesen. Er hatte wiederholt Erfolg damit, grundsätzliche Eigenschaften und wesentliche Bestandteile der Stringtheorie zu identifizieren. Und nun hat er gemeinsam mit seinen Kollegen generell in Frage gestellt, ob sich damit überhaupt Universen mit konstanter Dunkler Energie konstruieren lassen.

Sie waren damit nicht ganz glücklich, oder?

Nein, denn Vafa und seine Kollegen hatten diese mathematische Vermutung zunächst in sehr allgemeiner Form formuliert, in der selbst instabile De-Sitter-Lösungen verboten waren. Ich habe daraufhin gemeinsam mit meinen Kollegen Frederik Denef und Timm Wrase argumentiert, dass dies zu Widersprüchen mit der uns bekannten Teilchenphysik führt, genauer gesagt dem Higgs-Mechanismus, der Teilchen eine Masse gibt. Auch Kollegen haben Kritik gegen die Vermutung vorgebracht. Vafas Gruppe und andere haben die Aussage dann ein paar Monate später präzisiert und dadurch abgeschwächt. Zum einen sollen nun nur noch stabile oder metastabile De-Sitter-Universen im Konflikt mit der Stringtheorie stehen. Zum anderen könnte selbst das nur für einen bestimmten Teil der Landschaft denkbarer Universen gelten, nämlich solche, in denen die Wechselwirkungen sehr schwach sind.

Wie ist der Stand heute?

Die Hoffnung ist nach wie vor, die Vermutung zu widerlegen oder sie zu beweisen – und so in ein Theorem zu verwandeln. So läuft das in der mathematischen Physik häufiger. So weit sind wir jedoch noch nicht. Ich halte es für wahrscheinlich, dass die Vermutung zumindest in der zuletzt genannten, schwächsten Form wahr ist. Aber wichtiger und interessanter wäre natürlich eine stärkere, die ganze »Landscape« betreffende Aussage.



Die kleinsche Flasche zählt zu den Lieblingsobjekten von Stringtheoretikern. Sie besteht aus einer zweidimensionalen Fläche ohne Rand, bei der sich innen und außen nicht unterscheiden lassen. In drei Raumdimensionen lässt sich das nicht überschneidungsfrei darstellen, wohl aber in vier.

TTRUNG (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:KLEIN_BOTTLE.SVG) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/LEGALCODE)

Was bedeutet das alles für das beobachtbare Universum?
Wenn die von Vafa und Kollegen vorgebrachte Vermutung ganz allgemein gelten sollte und die Stringtheorie tatsächlich die Realität beschreibt, dann kann die Dunkle Energie nicht die Form haben, von der die meisten Kosmologen heute ausgehen. Aktuell vermuten wir ja, dass die Dunkle Energie konstant ist, ihre Dichte sich mit der Zeit also nicht verändert. So sieht es das kosmologische Standardmodell vor, das größtenteils sehr gut zu den Messdaten passt. Damit würden wir in einem metastabilen De-Sitter-Universum leben, was laut der Vermutung nicht mit der Stringtheorie kompatibel wäre.

Sehen Sie einen Ausweg?
Die Dichte der Dunklen Energie könnte nicht konstant sein, sondern ihren Wert mit der Zeit verringern. Unter dem Namen »Quintessenz« wird diese Möglichkeit schon länger diskutiert. Eventuell könnte das unser Universum mit der besprochenen Vermutung versöhnen, so scheinen es jedenfalls einige meiner Kollegen zu sehen. Ich bin da etwas skeptischer: Wenn man sich die Sache in einem größeren Kontext ansieht, löst die Quintessenz auch nicht alle Probleme der KKLT-Konstruktion und der De-Sitter-Universen. Es ist kompliziert.

Kann die Sache denn zu einer Gefahr für die Stringtheorie werden? Was wäre, wenn sich zeigen sollte, dass die Dunkle Energie in unserem Weltall konstant ist und gleichzeitig Vafas Vermutung bewiesen werden würde?
Damit würde man alle Weltmodelle falsifizieren, die auf bisher bekannten Kompaktifizierungen der Stringtheorie fußen. Das wäre hervorragend. Nicht so sehr für die Leute, die sich in ihren Papern ausführlich Gedanken zu diesen Möglichkeiten gemacht haben. Aber für die Wissenschaft wäre es ein großer Fortschritt. Ein Aus für die Stringtheorie wäre das aus meiner Sicht allerdings nicht. Sie könnte durchaus noch auf andere Art und Weise mit der realen Welt in Verbindung stehen. Dann müssten wir jedoch gewissermaßen auf null zurückgehen und uns ganz neue Gedanken machen.

Macht Ihnen das keine Sorgen?
Nein, nicht wirklich. Ich hätte eher Angst davor, dass man zu früh verkündet, dass es so ist, ohne es definitiv zu wissen. Wir reden hier nach wie vor von einer Vermutung, die nicht bewiesen ist und deren mathematische Begründung noch nicht ganz klar ist. Auch mit Blick auf die kosmologische Situation gibt es noch große Unsicherheiten. Ich sehe die Gefahr also eher darin, dass man die Stringtheorie aus diesen Gründen vorschnell ablehnt.

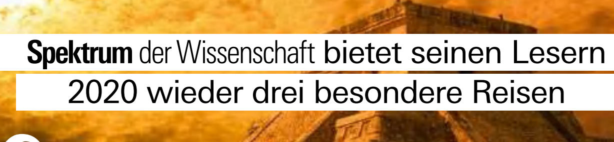
Wo könnte die Stringtheorie in fünf Jahren stehen, was ist Ihre Hoffnung?
Idealerweise hat man bis dahin die Existenz KKLT-artiger Lösungen besser untermauert – oder man kann diese gänzlich ausschließen. Vielleicht entdeckt man dabei mit Hilfe der Mathematik auch andere mögliche Universen, die unserem ähneln. Sonst hoffe ich natürlich auf empirische Hinweise: auf großskalige Spuren in der kosmischen Hintergrundstrahlung, die Aussagen über eine bestimmte Form von Inflation im Urknall liefern würden. Es gibt hier eine Variante, die so genannte Axion-Monodromy-Inflation, die in der Stringtheorie sehr schwierig zu realisieren wäre. Sie könnte uns helfen, die aus der Theorie erwachsenden Möglichkeiten besser zu verstehen. Ebenfalls hilfreich wäre, wenn wir in Sachen Dunkler Materie vorankämen. Derzeit wird ja verstärkt diskutiert, ob diese nicht aus Axionen oder axionartigen Teilchen bestehen könnte (siehe **Spektrum** März 2019, S. 12). Das sind sehr leichte Partikel, die auch in der Stringtheorie eine Rolle spielen.

Seit einigen Jahren steht der Gedanke im Raum, die Stringtheorie könnte auch ohne empirische Belege zur einzig gültigen Theorie der Quantengravitation erklärt werden – einfach weil sie so elegant und gewissermaßen alternativlos ist. Glauben Sie, dass es so kommt?
Das scheint mir weder wahrscheinlich noch vernünftig zu sein. Theorien werden konkurrieren, bis es zu einer experimentellen Klärung kommt. Solange es nicht genug Daten gibt, wird sicherlich auch nicht eine Theorie dominieren können. Die Stringtheorie ist ja nicht der einzige mögliche Weg zu einer Vereinigung von Quantenphysik und allgemeiner Relativitätstheorie. Sie ist lediglich der derzeit am besten entwickelte und am besten verstandene.

Einstein soll einmal seinen Assistenten Banesh Hoffmann gefragt haben, ob Gott eine Wahl hatte, als er das Universum erschaffen hat. Wie sehen Sie das?
(Denkt kurz nach) Ich interpretiere die Frage so, ob es verschiedene Weltformeln gibt, die auf verschiedene Realitäten hinauslaufen. Nicht im Sinne von verschiedenen Lösungen der Stringtheorie, sondern wirklich völlig verschiedene, grundlegende, in sich konsistente Theorien, aus denen jeweils eine andere Welt folgt. Die Theorien dürften dabei nicht auseinander hervorgehen und nicht dual zueinander sein. Und doch müsste aus ihnen etwas folgen, in dem Struktur, Leben und Entwicklung möglich ist. Das ist eine Frage, mit der ich mich sehr schwertue.

Weil sie an die bei Physikern eher unbeliebte Frage nach einem Schöpfer rührt?
Nein. Es stimmt zwar, dass ich mich mit Spekulationen zu dieser Frage zurückhalten möchte. Aber ich bin aus einem anderen Grund zögerlich. Es streiten da zwei Geister in meinem Kopf. Als Physiker mit einer großen Vorliebe für mathematische Eleganz liegt es mir einerseits sehr nahe zu sagen: Die allem zu Grunde liegende Theorie muss mathematisch eindeutig sein. Sie muss unsere Welt – beziehungsweise das Multiversum, sofern es dieses gibt – erzwingen. Andererseits widerstrebt mir ein solcher Alleinherrschaftsanspruch. Ich denke mir: Warum sollte es nicht auch andere Möglichkeiten geben? ◂

Die Fragen stellte **Spektrum**-Redakteur **Robert Gast**.



Leserreisen

ERSTES HALBJAHR 2020







RIESENTELESKOPE UNTER SÜDLICHEM STERNENHIMMEL

Eingeplant sind bei dieser Leserreise im Januar 2020 der Besuch von La Silla, dem ersten und lange Zeit einzigen Observatorium der Europäischen Südsternwarte ESO, vom Cerro Paranal mit dem Very Large Telescope (VLT) sowie eine ausgiebige Stippvisite bei der Konstruktionsebene von ALMA, dem Atacama Large Milimeter/submilimeter Array.
Landschaftlich stehen vor allem die Atacamawüste und die fantastische Welt der hohen Anden auf dem Programm: San Pedro de Atacama, die große Salzkordillere, der viertgrößte Salzsee der Welt, die Hochlandlagunen des Altiplano und die Geysire des Vulkans El Tatio. Teleskopbeobachtungen am eindrucksvollen Himmel der südlichen Hemisphäre ergänzen dieses erlebnisreiche Reiseprogramm.

Reisedatum: 13.–27. 1. 2020, 15-tägig
Preis DZ/F € 5.890,–
Thematische Betreuung:
Dr. Klaus-Peter Schröder

ARCHÄOASTRONOMIE UND TIGRE

Diese besondere Leserreise nach Mexiko führt uns zuerst 14 Tage nach Yucatán zu den berühmten Mayastätten und zur Tag-und-Nacht-Gleiche nach Dzibilchaltún. Wir erkunden mit dem Archäoastronomen Jesus Galindo das beeindruckende Erbe der Mayakultur. Ein Höhepunkt der Reise ist eine Sonderführung in Chichén Itzá. Weiterhin stehen der Besuch der Höhle von Loltún, eine Bootsfahrt im Biosphärenreservat Ria Celestún und zum Abschluss ein Aufenthalt auf der Karibik-Insel Cozumel auf dem Programm. In der Verlängerungswoche bereisen wir vier Tage Mexiko-Stadt und drei Tage die Silberstadt Guanajuato. In Guanajuato ist ein Vortrag mit dem hier an der Universität lehrenden Sonnenforscher Klaus-Peter Schröder geplant, der uns zudem das wissenschaftliche Gemeinschaftsprojekt TIGRE der Universitäten Hamburg, Lüttich und Guanajuato näherbringen wird.

Hauptreise: 10.–25. 3. 2020, 16-tägig
Preis DZ/HP: € 3.950,–
Verlängerung: 24. 3.–2. 4. 2020, 9-tägig
Preis DZ/HP: € 1.230,–

DIE POLARLICHTREISE NACH NORDSKANDINAVIEN

Auch im März 2020 geht es wieder zu den eindrucksvollen Polarlichterscheinungen des hohen Nordens. Ziel ist der 69. Breitengrad rund um der Inarisee in Finnland und der 70. Breitengrad im nordnorwegischen Pasviktal bei Kirkenes. Das Reiseprogramm am Inarisee und im Pasviktal an der russischen Grenze bietet neben geführten Polarlichtbeobachtungen bei stabilem Festlandklima und interessanten Vorträgen viele Winteraktivitäten zur Auswahl: Husky-, Rentier- oder Schneescooter-Safaris sowie eine Königskrabben-Safari. Auch die lappländische Samen-Kultur wird bei dieser Reise nicht zu kurz kommen. Die Reise wird von unserem erfahrenen Polarlichtspezialisten Joachim Biefang betreut. Vorträge, laserunterstützte Führungen am Nordhimmel und ein handliches Planetarium sind auch dabei.

Reisedatum: 15.–24. 3. 2020, 10-tägig
Preis im DZ/HP: € 2.690,–
Thematische Betreuung: Joachim Biefang

Infopaket bei unserem Reiseveranstalter:
WITTMANN TRAVEL, 21129 Hamburg, Urenfleet 6e, Tel.: 040 85105-376, Fax: 040 85105-377, E-Mail: info@wittmann-travel.de
www.wittmann-travel.de

JOSEIGNACIOSOTO / GETTY IMAGES / ISTOCK; CHILE, MEXICO, LAPPLAND: MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON WITTMANN TRAVEL



FRANZI SCHÄDEL (FLORIAN-FREISTETTER.DE/PRESSE/) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/4.0/LEGALCODE)

FREISTETTERS FORMELWELT
WENN ZAHLEN INS GETRIEBE KOMMEN

Natürliche Zahlen begegnen uns schon in der Grundschule – und doch verhalten sich einige von ihnen völlig anders, als es die menschliche Intuition voraussagt.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

⏩ spektrum.de/artikel/1669402

Die meisten Gebiete der Mathematik haben nichts mit Rechnen zu tun. Stattdessen geht es häufig um die Beziehung zwischen Dingen, für die Zahlen nur ein simples Beispiel sind. Trotzdem überraschen mich selbst einfachste Zahlen immer wieder. Auch wenn die vertrauten Ziffern von 0 bis 9 an sich keine tieferen Geheimnisse zu bergen scheinen, sorgen sie geeignet kombiniert mitunter für Phänomene, die unseren Verstand übersteigen.

Das zeigt sich unter anderem in der Formel des 1937 geborenen englischen Mathematikers John Conway:

$$n = abcd\ldots \longrightarrow n' = a^b c^d \ldots$$

»*n*« bezeichnet hier eine beliebige natürliche Zahl, die sich durch die Ziffern *a*, *b*, *c*, *d* und so weiter im Dezimalsystem darstellen lässt. Bei 3462 wäre also $a = 3$, $b = 4$, $c = 6$ und $d = 2$. Laut Conways Formel bildet man daraus eine neue Zahl n', indem man jede Ziffer zur Potenz der nachfolgenden erhebt und die Ergebnisse miteinander multipliziert (sollte *n* aus einer ungeraden Anzahl von Ziffern bestehen, wählt man die 1 als Exponent der letzten Ziffer).

In unserem Beispiel ist daher $n' = 3^4 \cdot 6^2$ und man erhält 2916 (= 81 · 36). Setzt man diese Zahl wieder in die Formel ein, folgt $2^9 \cdot 1^6$, was 512 ergibt, woraus sich wiederum $5^1 \cdot 2^1 = 10$ berechnen lässt, so dass man schon fast das Ende der Kette erreicht. Man kann das Ergebnis ein letztes Mal in die Formel einsetzen, bevor nur noch eine Ziffer übrig ist: $1^0 = 1$.

Conway nannte den Vorgang einen »powertrain« (englisch für Antriebsstrang). Er fährt gnadenlos über jede Zahl und reduziert sie am Ende auf eine einzelne Ziffer. Denn tatsächlich ist das – wenn auch oft erst nach sehr viel mehr Durchgängen als im Beispiel – fast immer der Fall. Conway selbst entdeckte nur eine Zahl, die dem Powertrain Widerstand leistet: 2592. Hier stockt die Kette; aus $2^5 \cdot 9^2$ wird wieder 2592 (= 32 · 81).

Die Zahl ist also ein Fixpunkt. Conway konnte zeigen, dass es nur zwei Möglichkeiten gibt: Entweder der Powertrain reduziert eine Zahl auf eine Ziffer oder er landet bei einem Fixpunkt. Beispielsweise endet er bei 2534 wegen $2^5 \cdot 3^4 = 32 \cdot 81 = 2592$ bereits nach einem Schritt. Sieht man von einzelnen Ziffern ab, fand Conway neben der 2592 keinen anderen Fixpunkt. Sein Kollege Neil Sloane stellte allerdings fest, dass 24 547 284 284 866 560 000 000 000 im Powertrain eingesetzt wieder zu genau dieser Zahl führt (mit der Konvention $0^0 = 1$).

Dass zwei so unterschiedliche Zahlen diese Eigenschaft teilen, ist erstaunlich. Die Überraschung wird aber noch größer, wenn man bedenkt, dass es vermutlich die einzigen beiden Zahlen dieser Art sind. Einen exakten Beweis dafür gibt es noch nicht, doch unter den untersuchten Zahlen bis 10^{100} ist bis jetzt kein weiterer Fixpunkt aufgetaucht.

Man würde Fixpunkte ohnehin eher bei kleineren Zahlen erwarten. Denn je mehr Stellen eine Zahl besitzt, desto größer ist die Chance, dass eine Null auftaucht, wodurch der Powertrain sie schnell zu einer einzelnen Ziffer reduziert. Was genau die 2592 und die 24 547 284 284 866 560 000 000 000 verbindet, ist nur eines von unendlich vielen faszinierenden Rätseln, welche die Mathematik hervorbringt. Ich kann mir daher nicht vorstellen, dass diese Wissenschaft jemals langweilig wird.

SKANDINAVIEN

DIE SCHÄTZE DER WIKINGER

Goldschmuck kennzeichnete den erfolgreichen Wikingerkrieger ebenso wie den treuen Gefolgsmann seines Königs – das verraten Überlieferungen und Grabbeigaben. Doch die in manchem Hort zu findenden goldenen Ringe scheinen eine andere Funktion gehabt zu haben. Nur welche?




Die prähistorische Archäologin **Heidemarie Eilbracht** (links) vom Berliner Museum für Vor- und Frühgeschichte forscht in einem Projekt der Mainzer Akademie der Wissenschaften und Literatur zur Geschichte des Ostseeraums. Die Archäologin **Antje Wendt** arbeitet als Kuratorin an den Staatlichen Historischen Museen in Stockholm mit der wikingerzeitlichen Sammlung.

spektrum.de/artikel/1669016

AUF EINEN BLICK
METALL DER MÄCHTIGEN

1 Während des Wikingerzeitalters (800–1050) flossen große Mengen Silber, aber auch Gold durch Raubzug, Handel und Diplomatie nach Skandinavien.

2 Aus beiden Edelmetallen fertigten Schmiede eleganten Schmuck. Vor allem solcher aus Gold diente wohl als Statussymbol, während silberner, in Stücke gehackt, auch ein Zahlungsmittel war.

3 Überlieferungen zufolge schenkten Herrscher ihren Gefolgsleuten goldene Ringe. Unklar ist, warum diese sich dann nicht in den Gräbern der Elite finden, sondern in Schatzhorten.

»An ihrer Kleidung sieht man und an ihren Goldringen, dass sie Freunde des Königs sind«, beschrieb der Dichter Thorbjörn Hornklaue die Gefolgsleute Harald Schönhaars (um 852–933), des ersten norwegischen Königs. In seinem Loblied verrät er auch die Quelle des kostbaren Schmucks: Der König hatte sie seinen Männern geschenkt, offenbar als Zeichen der Anerkennung oder als Dank für ihre Gefolgschaft. Vergleichbare Überlieferungen bezeichnen die Monarchen als »Ringbrecher« – ein Ausdruck für einen freigiebigen Mann, der sein Gefolge großzügig belohnte.

Glanz, Farbe und Seltenheit machten Gold zu einem sozialen und politischen Statussymbol. Auch die Feinschmiede, die es zu verarbeiten wussten, genossen hohe gesellschaftliche Anerkennung. Wie etwa jene beiden aus dem Gefolge der schwedischen Königin Sigrid († nach 1014). Sie erkannten einen Ring, den ihr der norwegische König Olav Tryggvason (regierte 995–1000) als Verlobungsgeschenk gesandt hatte, als Fälschung. Tatsächlich bestand er nicht wie angegeben aus massivem Gold, sondern nur aus vergoldetem Kupfer! Die Heirat kam nicht zu Stande.

Immer wieder erwähnen skandinavische Lieder und Sagas das Edelmetall. Einen besonderen Stellenwert genossen dabei aus Gold geschmiedete Ringe. Sie gehörten oft Göttern und brachten ihren Besitzern Glück oder Unglück. So spielt Andvaranaut, der Ring eines Zwergs, eine Rolle in den Sigurd-Liedern, einer nordischen Variante des Nibelungenlieds. In der wohl in der Völkerwanderungszeit wurzelnden Sage trägt dieser Ring einen Fluch: Seinem Besitzer droht der Tod. Über den Schatz des Drachen Fafnir gelangt er in Sigurds Besitz – und das Schicksal nimmt seinen Lauf.

Hingegen symbolisierte der Ring Draupnir Reichtum und Überfluss, tropften doch in jeder neunten Nacht acht neue Ringe von ihm ab, ein jeder so schwer wie das Original. Der Draupnir galt als Attribut Odins, des Herrn der Götter, des Krieges, der Magie und des Todes. Zwerge



Der Goldschatz von Hoen wurde 1834 beim einstigen Wikingerhof Hoen-Gård im Oslofjord entdeckt. Er enthält etwa 200 Objekte, darunter Hals- und Armringe, Kettenanhänger, Perlen aus Gold und Glas sowie goldene und silberne Münzen. Die Preziosen stammen aus der Zeit vom 4. bis 9. Jahrhundert.

SERIE

Gold und Macht

MUSEUM OF CULTURAL HISTORY, UNIVERSITY OF OSLO / OVE HOLST (PRESSEBILD)

hatten ihn geschmiedet, gemeinsam mit Thors Hammer und dem goldenen Eber, der den Wagen des Naturgotts Freyr zog.

Archäologen bergen in einstigen Siedlungen und Gräbern jener Epoche immer wieder Schmuck aus Gold oder Silber. Nicht nur in Skandinavien selbst, sondern auch in England und Irland sowie im Osten Europas, was sich gut an Formen und Ornamenten erkennen lässt. Die meisten Edelmetallfunde stammen aber aus den als Horte bezeichneten Schatzdepots, von denen die meisten der heute bekannten schon im 19. und zu Anfang des 20. Jahrhunderts zu Tage kamen. Allerdings besteht der Großteil aller Fundstücke aus Silber, das in der Wikingerzeit (siehe »Kurz erklärt: Die Wikinger«, S. 87) offenbar reichlich verfügbar war. Den Wert des Goldes steigerte das aber nur noch.

Wohlgemerkt: Keines der Edelmetalle wurde zu jener Zeit in Nordeuropa selbst gewonnen. Vieles stammt wohl aus jenen Raubzügen gegen Klöster und Siedlungen Westeuropas, die unser Bild des Wikingers prägen, sowie aus Tributen und Schutzgeldern, mit denen die Bedrohten solches Unglück abzuwenden hofften. Zum Beispiel überließ der westfränkische König Karl der Kahle Chroniken zufolge im Jahr 845 einem Häuptling namens Ragnar 7000 Pfund Silber, damit dieser mit seinen Kriegern aus dem Gebiet der Seine abzog. 856/57 warb er für einen ähnlichen Preis – 6000 Pfund Silber – den Wikinger Weland an, eine andere Gruppe Nordmänner zu vertreiben. Der erfüllte zwar seinen Auftrag, gewährte den Invasoren jedoch freies Geleit – gegen die gleiche Menge Gold und Silber.

Kriegerische Kaufleute

Solche Summen waren keine Seltenheit, wie zeitgenössische Verwaltungslisten und Chroniken verraten. Zudem gab es eine weitere Quelle der Edelmetalle, denn die Wikinger waren nicht nur gefürchtete Krieger, sondern auch weit reisende Händler. Mit dem gleichen Mut und nautischen Geschick, mit dem sie Raubzüge unternahmen, belieferten sie ferne Märkte – selbst in den von Plünderung bedrohten Ländern – mit Prestigegütern wie Walrosselfenbein und kostbaren Pelzen sowie Sklaven. Dass beispielsweise im fränkischen Reich, bei den Angelsachsen und in den arabischen Kalifaten Silbermünzen die vorherrschende Währung darstellten, erklärt die Dominanz dieses Edelmetalls im wikingischen Skandinavien.

Dazu kamen wertvolle Geschenke im Rahmen diplomatischer Beziehungen insbesondere zwischen wikingischen Eliten und fränkischen Herrschern. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise auch die politisch motivierte Übernahme des christlichen Glaubens zu sehen. Als sich der dänische Thronanwärter Harald Klakk in den 820er Jahren von Ludwig dem Frommen, dem Sohn und Nachfolger Karls des Großen, in Mainz taufen ließ, erhielt er laut einem Lobgedicht auf Ludwig Geschenke, »wie sie der Franken Gebiet nur zu erzeugen vermag«. Dazu gehörten goldverzierte Kleidungsstücke, »goldene Gehänge« – vermutlich Schmuckketten – und Sporen.

Dass inzwischen mehrere tausend Edelmetallartefakte aus den 250 Jahren der Wikingerzeit ans Licht gekommen sind, verwundert daher nicht. Die Skandinavier benötigten dafür keine Minen oder Flussgoldwäscher. Hinzu kam sicherlich die Wiederverwendung von »Altmetall« aus vorangegangenen Epochen. Während des 3. bis 5. Jahrhunderts, also der ausgehenden römischen Kaiserzeit und der Völkerwanderungszeit, waren Goldmünzen im Zuge von Handel und Söldnerdiensten aus dem Imperium nach Skandinavien gelangt, eingeschmolzen und zu Schmuck oder Ringgeld verarbeitet worden. Silber hatte in dieser Phase Nordeuropas eine untergeordnete Rolle gespielt.



STRALSUND MUSEUM (INV.-NR. 1873:499B); FOTO: SABINE SUHR, LANDESAMT FÜR KULTUR UND DENKMALPFLEGE MECKLENBURG-VORPOMMERN

Die Scheibenfibel des Goldschatzes von Hiddensee hat einen Durchmesser von 80 Millimetern und wiegt 114 Gramm. Die Schauseite (oben) ist mit einem Ornament aus stilisierten Tierkörpern verziert. Diese wurden mit Golddrähten und -kügelchen (Filigran- und Granulationstechnik) aufwändig dekoriert. Die Rückseite (unten) trug eine Konstruktion, um das Gewand zu verschließen; die zugehörige Nadel ist verloren. In der Öse am Rand konnte man Ketten befestigen. Die Fibel gehört zu einem 16-teiligen Schatzfund, der in den 1870er Jahren auf der Insel Hiddensee zu Tage kam.



Die bronzenen Pressmodeln gehören zu einem Set von insgesamt 41 Exemplaren, die 1979 im Hafen der Wikingersiedlung Haithabu gefunden wurden. Feinschmiede legten Bleche aus Gold und Silber darauf und drückten mit einem weichen Stab das jeweilige Muster in das Blech hinein.

WIKINGER MUSEUM HAITHABU

Sicherlich war dieses Gold zum Teil auch während der Wikingerzeit noch im Umlauf, sei es als Erbstück, als umgearbeiteter Schmuck oder schlicht als eingeschmolzenes und wieder vergossenes Altgold.

Das demonstriert zum Beispiel der mit etwa 2,5 Kilogramm schwerste bislang entdeckte Hort jener Epoche, der Goldschatz von Hoen (siehe Bild S. 83). Das im Osloer Fjord geborgene Ensemble besteht sowohl aus in Skandinavien hergestelltem Schmuck als auch aus importierten Objekten, die beispielsweise aus Westeuropa, aus dem byzantinischen und dem britischen Raum kamen. Das jüngste stammt aus dem 9., das älteste aus dem 4. Jahrhundert.

Zu den schönsten Beispielen wikingischer Feinschmiedekunst zählt der Goldschmuck von Hiddensee aus 16 Teilen: eine scheibenförmige Fibel (Bild links), ein mehr als 150 Gramm schwerer offener Halsring, der sich mit einem Haken und einer Öse schließen ließ, zehn kreuzförmige Anhänger und vier kleinere Stücke, alles zusammen knapp 600 Gramm des Edelmetalls. Experten datieren den Hort auf das späte 10. Jahrhundert. Materialanalysen zufolge bestehen alle Objekte aus Gold mit einem Feingehalt von 92 bis 96 Gewichtsprozent; das entspricht 22 bis knapp 24 Karat. Eine derartig hohe Reinheit bei einer so großen Menge ließ sich wohl nur durch Läutern erreichen. Bei diesem chemischen Verfahren wird der Schmelze Blei zugesetzt, das unedlere Bestandteile in einer Schlacke bindet. Das Kupellation genannte Verfahren wurde in der Antike im Mittelmeerraum entwickelt und unter anderem von den Kelten übernommen.

Ob für ein Schmuckstück des Hiddensee-Schatzes Altgold verwendet wurde, das lange zuvor andernorts geläutert wurde, lässt sich mit den heutigen Methoden nicht beantworten. Archäologen haben aber in Wikinger-Werkstätten durchaus Hinweise auf Kupellation entdeckt, beispielsweise Schlacken und Herdgruben mit hohem Bleigehalt; die Technik war also vermutlich auch in Skandinavien bekannt.

Archäologen gehen davon aus, dass Münzen und Schmuck im Lauf der Jahrhunderte häufig eingeschmolzen wurden. Dabei kam Gold aus verschiedenen Quellen und mit diversen Reinheitsgraden zusammen. Insgesamt aber war geläutertes Material eine Ausnahme. In enger Koopera-

tion erkundeten Chemiker, Physiker, Restauratoren und Archäologen zudem die Fertigungstechniken des Hiddensee-Schmucks. So umfassen die Fibel und die Anhänger hunderte kleine Einzelteile aus sehr gleichartigem Gold. Offenbar hatte man eigens Drähte und Bleche gegossen, diese geschmiedet sowie anschließend die für ein Schmuckstück benötigten Teile abgetrennt und bearbeitet. Ebenso wie die Scheibenfibel besteht auch der Hauptkörper eines Anhängers aus zwei Goldblechen für Vorder- und Rückseite. Letztere ist plan und mit einer Öse versehen, in die kleine Dekorelemente eingehängt werden konnten. In das Blech der Vorderseite hatte man ein Muster gepresst: Bei der Scheibenfibel war es ein verschlungenes Tier-, bei den verschiedenen Anhängern symmetrische Bandornamente. Das Muster hat man abschließend mit Drähten und Kügelchen aufwändig verziert. Insgesamt wurden etwa 20 goldene und gut 80 silberne so oder ähnlich gestaltete Schmuckstücke geborgen.

Um etwas Derartiges zu schaffen, benötigten die Schmiede so genannte Pressmodeln aus massiver Bronze (siehe Bild S. 85). Solche Werkzeuge fanden sich an mehreren archäologischen Stätten, welche die Forscher als Herrschaftszentren deuten. Dazu zählen die Siedlungen Haithabu nahe Schleswig und Sigtuna im schwedischen Mälarsee sowie die dänische Ringburg von Trelleborg an der Westküste Seelands. Vermutlich war Schmuck vom Hiddenseetyp einer Elite vorbehalten und diente der Präsentation von Rang und Macht.

Wie dieser Hort auf die namensgebende Ostseeinsel gelangte und wer ihn dort vergrub, wird bis heute diskutiert. Vieles spricht dafür, dass der Schmuck Harald »Blauzahn« Gormsson gehörte. Er war ab 958 König von Dänemark und ab 960/962 bis zu seinem Tod 987 auch König von Norwegen. Auf einem seinen Eltern gewidmeten Runenstein im jütländischen Jelling bezeichnete er sich als »jener Harald, der für sich gewann ganz Dänemark und Norwegen und der die Dänen zu Christen machte«. In diesem Sinn wird der Goldschmuck von Hiddensee als Symbol seiner Macht und – nicht zuletzt der Kreuzanhänger wegen – als Ausdruck der neuen Religion interpretiert. Von seinem Sohn Sven abgesetzt, verließ Harald Dänemark. Ob er zuvor jenen Schatz vergraben ließ, wie es eine Legende behauptet, bleibt freilich ungewiss.

Der Schatz von Peenemünde

Hortfunde aus der Wikingerzeit, mit Schmuck, Münzen und Edelmetallbarren ausgestattet, sind keine Seltenheit. Im Allgemeinen enthalten sie aber hauptsächlich Silber. Reine Golddepots wie die von Hiddensee und Hoen sind selten, und diese beiden stechen unter den Ausnahmen sogar noch hervor, denn andere Goldhorte umfassen fast ausschließlich massive Ringe. Beispielsweise stieß eine Forstarbeiterin beim Pflanzen von Bäumen an der Nordspitze Usedoms 1905 auf zwei goldene Armringe und das Fragment eines weiteren. Drei Jahre später gingen Archäologen der Sache nach und entdeckten an gleicher Stelle noch einmal fünf solcher Objekte. Vermutlich trug man die Ringe am Arm, denn sie durchmessen jeweils weniger als zehn Zentimeter. Insgesamt wiegt der Schatz von Peenemünde (siehe Bild unten) etwa 390 Gramm. Das scheint auf den ersten Blick nicht viel,



Der Hortfund von Peenemünde besteht aus sieben vollständigen Goldarmringen und einem Teilstück. Zwei der Ringe und das Fragment fanden sich 1905 bei Waldarbeiten an der Nordspitze Usedoms, die übrigen fünf Armringe entdeckte man drei Jahre später. Auf Grund der Form lassen sich die Ringe in das 10. Jahrhundert datieren.

STRALSUND MUSEUM

Kurz erklärt: Die Wikinger

Als Wikingerzeit bezeichnet man heute die von 800 bis 1050 dauernde Phase des Mittelalters, die vor allem im Norden Europas eine Epoche des Umbruchs war. Die Bezeichnung »Wikinger« leitet sich vermutlich vom altnordischen »vikingr« ab, das so viel bedeutete wie »Seekrieger, der sich auf langer Fahrt immer weiter von der Heimat entfernt«. Tatsächlich ist es aber ein Sammelbegriff, eine entsprechende Ethnie gab es nicht. Allerdings pflegten die Fischer, Bauern, Händler und Krieger Skandinaviens überall eine ähnliche Lebensweise. Mächtige Großbauern herrschten gewissermaßen als Kleinkönige. Darunter folgten die freien, ebenfalls Grund besitzenden Bauern, freie Handwerker und Landarbeiter und schließlich Leibeigene.

Wer über die nötigen Mittel und Gefolgsleute verfügte, rüstete Schiffe aus für Beutezug oder Fernhandel. Über ein Netz aus Handelsbeziehungen, diplomatischen Kontakten und militärischen Bündnissen bis weit über Europa hinaus nahmen skandinavische Gruppen Impulse auf, die ihre politischen und kulturellen Strukturen verändern sollten. Beispielsweise lösten die dänischen, schwedischen und norwegischen Königreiche gegen Ende des 1. Jahrtausends kleinteiligere Herrschaftsstrukturen ab. Außerdem verdrängte das Christentum nach und nach den Glauben an die nordische Götterwelt. In diesen Prozessen spielten Machtsymbole eine wichtige Rolle, und Gold nahm dabei einen hohen Rang ein.

doch Experten schätzen anhand von schriftlichen Überlieferungen, dass Gold in jener Zeit als zehn- bis zwölfmal so wertvoll galt wie Silber. Vergleicht man den Hort von Peenemünde etwa mit dem 2018 entdeckten Silberschatz von Schaprode auf Rügen, so war dieser trotz seines beeindruckenden Gewichts von 1,5 Kilogramm nur halb so viel wert.

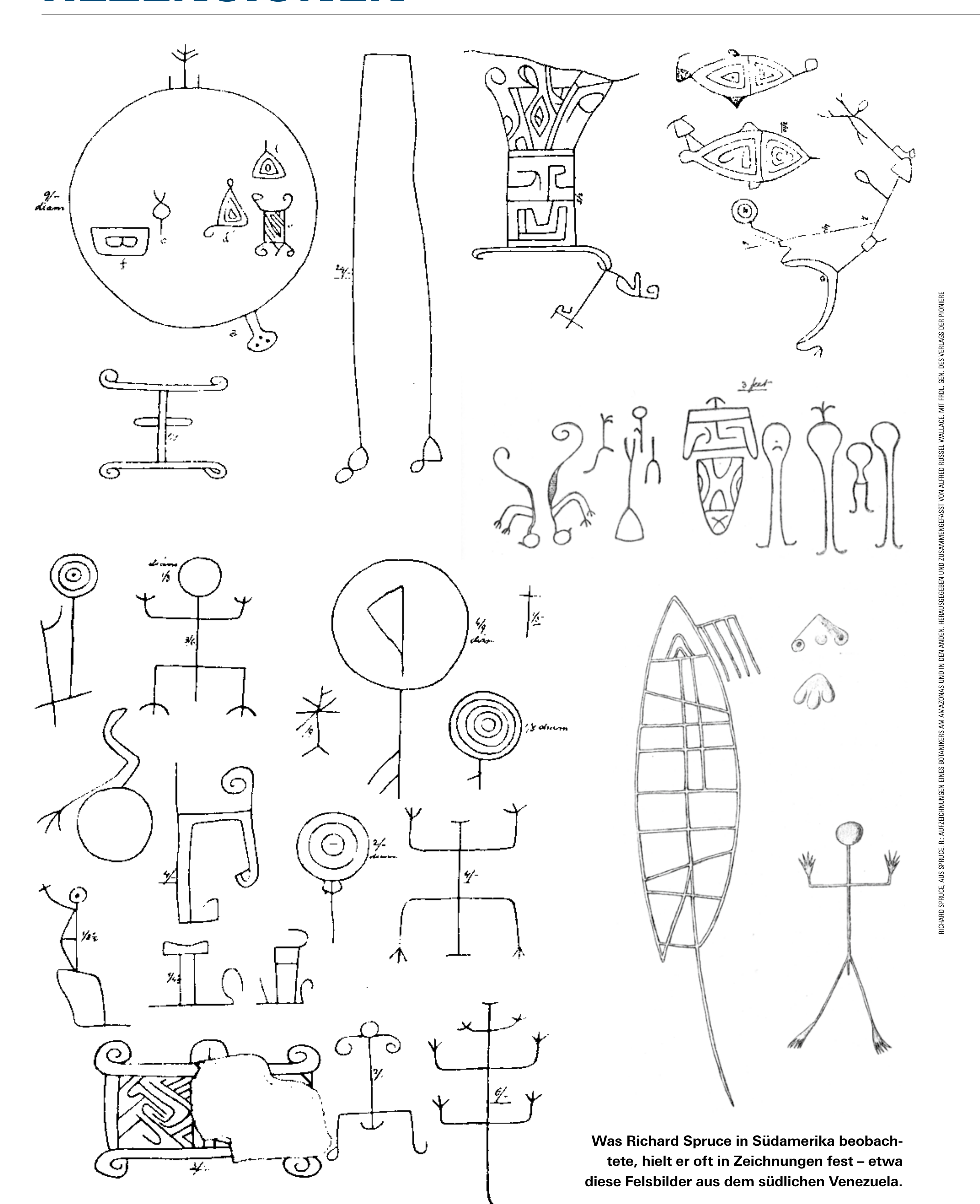
Dieser Rügener Hort bestand aus zirka 600 Stücken, zumeist Fragmenten von Münzen und Schmuck. Dabei zeigen die Kanten deutlich, dass die ursprünglichen Objekte absichtlich zerteilt wurden. Solches »Hacksilber« ebenso wie Waagen und Gewichtssätze verraten, wie man in der Wikingerzeit Waren und Dienste bezahlte: mit Edelmetallstücken, deren Wert nach ihrem Gewicht bemessen wurde. Gold aber hatte offenbar eine andere Funktion, denn Ringe daraus finden sich nicht in den Hacksilberdepots. Diese waren oft an markanten, leicht wiederzufindenden Stellen niedergelegt worden, etwa an Findlingen, Wegkreuzungen oder Grabhügeln. Vermutlich handelte es sich um Verstecke in unsicheren Zeiten, wobei Grabhügeln sicher ein besonderer Nimbus zukam. Depots in Mooren oder an Seeufern hingegen waren Gaben für die Götter, da diese Orte in vorchristlicher Zeit als Bereiche galten, die sowohl der irdischen als auch der übernatürlichen Welt angehörten. Diese Schätze sollten nicht zurückgeholt werden. Sie waren vielleicht Investitionen in der Hoffnung auf göttlichen Beistand für ein mit Risiken behaftetes Unternehmen oder Dankesopfer für eine glückliche Heimkehr. Außerdem erzählen Überlieferungen von einem Gesetz Odins, wonach alles vor dem Tod eigenhändig Vergrabene im Jenseits zugänglich sei. Allerdings melden einige Experten Zweifel an der Verlässlichkeit dieser Berichte an.

Noch rätselhafter ist eine Lücke zwischen den schriftlichen und den archäologischen Quellen. Denn die von den Überlieferungen inspirierte Deutung der Goldringe im Kontext von Gefolgschaft hat einen Schönheitsfehler: Bislang kommen sie nur in Horten, nicht aber als Grabbeigaben zu Tage. Das passt nicht gut zu ihren postulierten gesellschaftlichen Funktionen. Wenn ein Verstorbener Waffen und sonstigen wertvollen Besitz auf seine letzte Reise mitnimmt, warum nicht auch seine Rangabzeichen? Zumal solcher Brauch vor der Wikingerzeit durchaus üblich gewesen war, wie goldene Hals-, Arm- und Fingerringe aus älteren Gräbern Wohlhabender beweisen.

Wunderbare Schätze, jedoch schlecht dokumentiert

Die umgekehrte Frage harrt ebenfalls der Antwort: Wenn nicht in Gräbern, warum deponierten die Wikinger Goldringe in Horten? Die Unkenntnis liegt nicht zuletzt daran, dass die Schätze meist zufällig zu Tage kamen, noch dazu in einer Zeit, in der eine penible Dokumentation von Ort und Fundumständen noch unüblich war. Ob die Ringe eher als Opfer an einem heiligen Ort dargebracht wurden oder zur Besitzsicherung, lässt sich daher nicht entscheiden. Jede Interpretation kann sich nur auf die Objekte selbst stützen. Für den Halsring aus dem Hort von Hiddensee kennt man ein wichtiges Detail: Mit einem Innendurchmesser von gerade einmal elf Zentimetern konnte ihn lediglich eine sehr junge Frau oder ein Kind tragen. Gebrauchsspuren zeigen, dass dies wirklich der Fall war. Für die Deponierung hat man ihn doppelt zusammengewunden, so dass er nur noch acht Zentimeter durchmaß. Experten vermuten, dass es mit allen anderen Stücken in einem Gefäß etwa dieser Öffnung eingebracht wurde; bei der Auffindung des Horts war es längst zerstört.

Den vielleicht rätselhaftesten Goldring entdeckten Bauern 1977 zufällig auf Seeland (Dänemark). Spätere Ausgrabungen brachten dort die Wikingersiedlung Tissø zu Tage. Mit 1,8 Kilogramm Gewicht ist er der schwerste wikingerzeitliche Einzelfund aus Gold. Materialanalysen ergaben einen Goldanteil von etwa 96 Prozent. Für ein Schmuckstück im klassischen Sinn war dieser Ring zu schwer und mit 30 Zentimetern Durchmesser auch viel zu groß. Diente seine Niederlegung also entgegen den bisherigen Annahmen doch schlicht als Wertdepot, von dem man sich bei Bedarf bediente? Oder war er eine Opfergabe für die Götter? Trotz naturwissenschaftlicher Analysen, sorgfältig dokumentierter Grabungen und einer kritischen Textanalyse der Schriftquellen ist es noch nicht gelungen, das Geheimnis der Wikinger-Goldringe zu lüften. ◂



RICHARD SPRUCE, AUS SPRUCE, R.: AUFZEICHNUNGEN EINES BOTANIKERS AM AMAZONAS UND IN DEN ANDEN. HERAUSGEGEBEN UND ZUSAMMENGEFASST VON ALFRED RUSSEL WALLACE. MIT FRDL. GEN. DES VERLAGS DER PIONIERE

Was Richard Spruce in Südamerika beobachtete, hielt er oft in Zeichnungen fest – etwa diese Felsbilder aus dem südlichen Venezuela.

WISSENSCHAFTS-GESCHICHTE

ZU UNRECHT VERKANNT

Richard Spruce, ein Zeitgenosse Darwins, hat umfangreiche Schriften über die Amazonasgegend hinterlassen. Jetzt sind sie endlich auch in Deutschland erschienen.

Am 18. Juni 1858 erhielt Charles Darwin – sein wichtigstes Werk über die Entstehung der Arten war fast fertig – einen beunruhigenden Brief von einem gewissen Alfred Russel Wallace, der sich gerade auf den Molukken aufhielt. Wallace, ein gelernter Feldvermesser, er verdiente sich sein Geld unter anderem damit, weltweit Pflanzen und Tieren zu sammeln und nach England zu verkaufen. In dem Brief teilte er seine Gedanken über die Entstehung der Arten mit, die Darwins eigenen Konzepten fast wörtlich glichen. Darwin war schockiert von dem Schreiben, schließlich lag seine Artentheorie schon seit Jahren unveröffentlicht in der Schublade und er fürchtete um seine Priorität. Dennoch brachte er die Fairness auf, den Brief zusammen mit einem von ihm selbst verfassten einschlägigen Artikel zu publizieren.

Zu den vielen Weltregionen, die jener Wallace aufsuchte, gehörte das Amazonasbecken, wo er Käfer, Schmetterlinge, Pflanzen und anderes sammelte. Dort hatte sich 1849 ein Freund, der junge Botaniker Richard Spruce (1817–1893), zu ihm gesellt. Spruce war in dieser Weltgegend völlig unerfahren, blieb aber volle 15 Jahre. Auf rund 800 Seiten schrieb er – in Form von Tagebucheinträgen, teils mit Skizzen, Zeichnungen und Karten sowie in langen Briefen – alles auf, was er in dieser Zeit unternahm und wie es ihm dabei erging. Er selbst hat nie ein Wort davon veröffentlicht; das tat erstmals im Jahr 1908 sein alter Freund Wallace, der das Material zusammenfasste und in zwei Bänden herausgab. Jetzt endlich ist es als einbändige Erstausgabe mit fast 1000 Seiten in Deutschland erschienen.

Der Wälzer ist keine Bettlektüre, aber er liest sich über weite Strecken wie ein Abenteuerroman, der den Vergleich mit Humboldts oder Darwins Werken nicht zu scheuen braucht. Spruce war meist ohne europäische Begleitung unterwegs und bezahlte Indigene dafür, etwa als Ruderer für ihn zu arbeiten oder beim Beschaffen von Objekten zu helfen, die für seine Kunden von Bedeutung sein könnten. Es ist schwer vorstellbar, was die Einheimischen wohl über den seltsamen weißen, offensichtlich wohlhabenden Mann dachten, der so eigenartige Dinge sammelte, die ihnen selbst kaum beachtenswert erschienen. Manche Exkursion fand im Sattel statt, und man kann nur staunen, dass die Gehilfen immer wieder geeignete Pfade im tropischen Regenwald fanden, auch wenn diese erst freigeschlagen werden mussten.

Richard Spruce
AUFZEICHNUNGEN EINES BOTANIKERS AM AMAZONAS UND IN DEN ANDEN
Herausgegeben und zusammengefasst von Albert Russel Wallace
Verlag der Pioniere, Berlin 2019
958 S., € 59,–

Was bei der Lektüre besonders auffällt, ist die Rücksichtslosigkeit des Autors gegenüber seiner eigenen Gesundheit, die ihn mehrfach aus dem Verkehr zog, aber nie am Weitermachen hinderte. 1860 erhielt er zusätzlich noch einen Auftrag von offizieller Seite. Die indische Regierung verlangte nach Samen und Jungpflanzen des Chinarindenbaums, eines Gewächses innerhalb der Gattung *Cinchona*, aus dessen Rinde sich Chinin extrahieren lässt, ein sehr wichtiges Mittel gegen Malaria und Fieber. Diese Anweisung war nicht leicht zu erfüllen, denn Spruce musste hierfür die richtige Art, den Roten Chinarindenbaum *(Cinchona succirubra*, heute *C. pubescens)* finden. In den Andentälern südlich der Stadt Quito, wo es welche gab, herrschte Bürgerkrieg; zudem brauchte Spruce eine Genehmigung für sein Begehren. Und selbst wenn er auf entsprechende Pflanzen stieß, musste er ihre Samen und Stecklinge so verpacken und transportieren, dass sie erhalten blieben. Das konnte schon an ganz einfachen Dingen scheitern: Woher beispielsweise bekommt man im Regenwald Kisten? Wie befördert man die Pflanzenteile trocken beziehungsweise lebendig bis an die Küste und dann auf ein Schiff?

Die gleichen Probleme stellten sich natürlich auch für Herbarblätter und zoologische Präparate. Spruce war eigentlich – wie er selbst mehrfach betonte – ein Bryologe, ein Mooskenner, und dabei auch noch spezialisiert auf die meist winzigen Lebermoose *(Hepaticae)*. Die anderen Pflanzen sammelte er »nebenbei«, weil sie Geld brachten, und unterschätzte die Anzahl ihrer oft neuen Arten. 1851 hatte er nach eigenem Bekunden »eine Sammlung von über 300 Arten in Barra (nahe Manaus) angelegt …«, was ungefähr 10 000 Papierbögen mit einzelnen Exemplaren oder Teilen davon entsprach. Sein Bedarf nach weiterem Papier stieg – und nach Holzkisten, die eigens angefertigt werden mussten.

Spruces Sorge um die vielen Sammlerstücke entlud sich in einer gewaltigen Wut auf die Schädlinge in einer seiner Unterkünfte: »Das Strohdach ist voller Ratten, Vampire, Skorpione, Kakerlaken und anderer Heimsuchungen der Gesellschaft.« In einer einzigen Nacht trugen Sauba-Ameisen von seinem Maniokmehl so viel fort, wie er selbst in einem Monat verbrauchte. Termiten hatten jeden Pfosten und Balken des Hauses ausgehöhlt; Blutflecken auf dem Boden zeigten die Aktivität von Vampir-Fledermäusen an. Spruce trug beim Schlafen Strümpfe und ein Tuch über dem Kopf; seine Mitbewohner hatten beim Aufwachen oft mehrere Vampire auf sich sitzen – an den Zehen, der Nase oder am Ohr. Dennoch kannte der Botaniker keine einzige Person, die von einem Vampir geweckt worden war!

Wie schon zuvor Humboldt, quälte Spruce sich am Chimborasso bis auf 12 500 Fuß (rund 3800 Meter) hinauf, wurde im Regenwald von Mücken zerstochen, kämpfte sich in Stiefeln durch sumpfige Wälder und fasste in

eine grüne Schlange, als er eine Ranke vor sich beiseiteschob. Er überstand ein Erdbeben in den Anden – und vergaß dennoch nie, zu sammeln und alles aufzuschreiben. Auch die Indigenen interessierten ihn. Er zeichnete ihre Gesichter, ihre Häuser und Dörfer und bestätigte die Erzählungen über wehrhafte Frauen, die »Amazonen«. Es lässt sich hier unmöglich alles wiedergeben, was er in seinen Schriften thematisiert, man bekommt aber den Eindruck, abenteuerlicher als zu seinen Zeiten kann es kaum zugehen.

Acht Karten ergänzen den Text; ein hervorragendes Glossar der verwendeten landesüblichen Bezeichnungen, ein Personenregister und ein ebenfalls sehr sorgfältiges Verzeichnis der wissenschaftlichen Pflanzennamen runden das schöne Buch ab. Rein botanische Berichte, die oft lange Pflanzenlisten enthalten, sind in kleinerer Schrift abgedruckt als der übrige Text und können bedenkenlos überlesen werden.

Richard Spruce hätte mehr Anerkennung in Deutschland verdient und wird insofern seit 150 Jahren unangemessen übergangen. Die rund 50-seitige biografische Einführung zu Beginn des Buchs macht darauf zu Recht aufmerksam. Das wissenschaftshistorische Werk und seine jetzige Herausgabe samt verlegerischem Risiko haben großen Respekt verdient.

Der Rezensent Jürgen Alberti ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.

ARCHÄOLOGIE
DIE ZUKUNFT DER VERGANGENHEIT

Per Weltraumarchäologie lassen sich frühere Bauwerke aus großer Höhe erkennen.

Der Begriff Space Archaeology, also Weltraumarchäologie, klingt nach Sciencefiction. Gemeint ist die Analyse von Satellitenbildern und Laserlicht, das an Bodenstrukturen zurückgestreut wird. Dank solcher Methoden können die Forscher bislang unentdeckte Strukturen unter der Erde erkennen. Die Ägyptologin Sarah

Sarah Parcak
ARCHAEOLOGY FROM SPACE
How the Future Shapes Our Past
Henry Holt and Co., New York 2019
288 S., € 27,–



Parcak ist eine der weltweit bekanntesten Koryphäen auf diesem Gebiet und hat schon an mehreren TV-Dokumentationen mitgewirkt. Dieses Buch, ihr erstes populärwissenschaftliches, gibt einen Überblick über die Geschichte und die Anwendungsmöglichkeiten der Satellitenarchäologie. Es ist aber auch ein persönlicher Erfahrungsbericht darüber, welche Erkenntnisse sich damit gewinnen lassen und wie diese selbst Fachleute bisweilen zum Staunen bringen.

Satellitenbilder, aufgenommen aus hunderten Kilometern Höhe, zeigen heute den Boden in so hoher Auflösung, dass Forscher darauf sogar Strukturen von weniger als 30 Zentimeter Ausdehnung sehen. Anhand subtiler Veränderungen, etwa im Pflanzenbewuchs, lassen sich so zum Beispiel die Grundmauern längst verschütteter Gebäude finden. Dadurch spüren Archäologen immer mehr Fundstätten auf, die bislang unbekannt waren.

Ein weiterer Vorzug der Perspektive aus dem All: Sie zeigt, wie Fundplätze miteinander und mit der umgebenden Landschaft zusammenhängen. Archivierte Fotos des amerikanischen Spionageprogramms Corona, das während des Kalten Kriegs den Vorderen Orient aus dem Weltraum überwachte, bilden archäologische Strukturen ab, die heute infolge von Erosion, Trockenheit oder Zerstörung nicht mehr zu erkennen sind. Modernere Aufnahmen, etwa von Google Earth, dokumentieren überall auf der Welt die Zerstörung durch Raubgrabungen.

Den verschiedenen Anwendungen der Space Archaeology widmet die Autorin jeweils einen eigenen Abschnitt, manchmal ein ganzes Kapitel. Wie die meisten Archäologen ist sie eigentlich auf eine bestimmte Region und Periode spezialisiert, in ihrem Fall das pharaonische Ägypten. Doch ihre Expertise in der Weltraumarchäologie hat sie mittlerweile auch zu den Wikingern nach Island und Schottland, zu den Maya nach Belize und zu den ältesten Spuren der Menschheit nach Kenia geführt, um nur einige zu nennen. Auch andere Forscher wenden entsprechende Techniken an, um beispielsweise nach Spuren der amerikanischen Ureinwohner in den Mangrovensümpfen Floridas zu suchen oder um Fundplätze in Peru zu dokumentieren, bevor Plünderer sie entdecken.

Was Parcak und ihre Kollegen mit Hilfe von Satelliten gefunden haben, beschreibt sie mit einer Faszination, die auch nach etlichen Ausgrabungen unvermindert anhält. Dabei verschweigt sie nicht die Grenzen der neuen Techniken – stellt jedoch klar, dass wie bei den meisten Computerpannen auch hier der Fehler meist vor dem Bildschirm passiert.

Der Charme des Buchs liegt darin, dass die Autorin nicht nur einzelne neue Techniken vorstellt, die das Feld der Archäologie revolutioniert haben. Parcak erläutert auch, wie diese Methoden mit der klassischen Ausgrabung zusammenwirken, wie sich die Archäologie stetig weiterentwickelt und wie Archäologen von Daten zu Interpretationen kommen. Ihr persönlicher und humorvoller Schreibstil macht selbst die trockenen Seiten dieser Wissenschaft für Laien zugänglich. Auch die Ausgrabungsromantik kommt nicht zu kurz, sei es in Form von Erinnerungen an die ägyptische Wüste oder an die Wälder Neufundlands. Das Buch überzeugt als leidenschaftliches Plädoyer dafür, die Vergangenheit sowohl mit althergebrachten wie neuen Methoden zu studieren. Denn die Satellitenarchäologie hat gezeigt, dass noch etliche Fundstätten ihrer Entdeckung harren.

Die Rezensentin Luise Loges arbeitet als Wissenschaftsjournalistin und Übersetzerin und promoviert derzeit im Fach Vorderasiatische Archäologie in Glasgow.

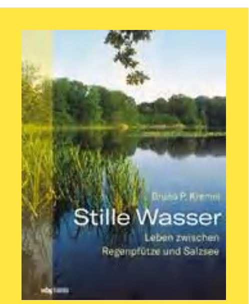
UMWELT
FASZINIERENDES WASSER

Von Dipolcharakter über Stillgewässer bis globale Verdunstung befasst sich Bruno P. Kremer eingehend mit dem flüssigen Element.

Wir Menschen erleben den Wasserplaneten Erde überwiegend als Festlandbewohner. Um das lebenswichtige Wasser zurück in unseren Fokus zu holen hat der Biologe und renommierte Sachbuchautor Bruno P. Kremer dieses Buch vorgelegt. Auf knapp 200 reich bebilderten Seiten befasst er sich ausführlich mit dem Stoff und führt seine Leser zunächst detailreich in die physikalischen und chemischen Geheimnisse des Wassermoleküls ein, bevor er sich den zahlreichen Formen der Stillgewässer zuwendet, wie es der Buchtitel verspricht.

Der Mensch habe seine Abhängigkeit vom Wasser immer schon sehr stark empfunden, beginnt Kremer seine Ausführungen. Davon zeuge die Verehrung der Substanz in zahlreichen Mythen und Religionen; etwa bei der christlichen Taufe oder in den rituellen Waschungen der Juden, Muslime und Hindus. Auch in Kunst und Sprache, etwa in Ortsbezeichnungen, sei das Wasser sehr präsent. Gegen Ende des 17. Jahrhunderts habe die Naturwissenschaft begonnen, dessen Stoffeigenschaften zu untersuchen. Die antike Elementelehre von Erde, Wasser, Luft und Feuer konnte in Zeiten der Aufklärung keine befriedigenden Antworten mehr liefern.

Bruno P. Kremer
STILLE WASSER
Leben zwischen Regenpfütze und Salzsee
WBG Theiss, Darmstadt 2019
192 S., € 40,–



Hierauf lässt der Autor einen »physiko-chemischen Ausflug« folgen, den er mit dem Urknall und der Entstehung des Wasserstoffs beginnt. Weiterhin beschreibt er den Dipolcharakter des Wassermoleküls samt dessen Neigung, Wasserstoffbrückenbindungen auszubilden; er vermittelt, dass es mehrere Sorten von Wassermolekülen gibt, je nach beteiligten Isotopen; er geht auf Kohäsions- und Adhäsionskräfte und schließlich auf die thermische Anomalie des Wassers ein. Kremer besitzt genug didaktische Expertise, um diese Themen unterhaltsam aufzuarbeiten. Viele vertraute Phänomene, etwa der Flüssigkeitstransport von Pflanzenwurzeln zu Triebspitzen, das Gleiten von Insekten auf Tümpeln oder das Schwimmen von Eisdecken auf Gewässern, werden mit diesen Informationen erklärlich.

Mit beeindruckenden Zahlen und launigen Vergleichen gibt der Biologe

Spektrum LIVE
Veranstaltungen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

1. November 2019
Hamburg

TASTING UND VORTRAG
Die Wissenschaft vom Whisky
Whisky ist ein komplexes Getränk – er überspannt das gesamte Spektrum von fruchtigen Noten bis zu herben Raucharomen. Doch welche Stoffe erzeugen Geruch und Geschmack der verschiedenen Whiskys, und wie kommen sie ins Glas? Der Chemiker und Journalist Lars Fischer erklärt die molekularen Hintergründe des schottischen Nationalgetränks und beantwortet nebenbei auch die alte Streitfrage: mit Wasser – ja oder nein?

Infos und Anmeldung:
Spektrum.de/live

KANAWA_STUDIO / GETTY IMAGES / ISTOCK

anschließend einen Eindruck von den Dimensionen des globalen Wasserkreislaufs. So beschreibt er die von der Sonne angetriebene Verdunstung, die jährlich weltweit etwa 500000 Kubikkilometer Wasser bewegt, als großräumig ablaufenden Destillationsprozess. Der Meeresspiegel würde dabei pro Jahr um 1,25 Meter fallen, wenn das Wasser nicht über Niederschläge und Flüsse ständig wieder in die Ozeane zurückkäme. Spannend ist, dass die gesamte Wassermenge aller Ozeane einmal in 3100 Jahren durch die Atmosphäre wandert oder dass sich verdunstetes Wasser im Schnitt nur elf Tage in der Atmosphäre aufhält, bis es erneut als Niederschlag auf die Erde fällt.

Nach dieser detaillierten Vorbereitung geht Kremer zu verschiedenen Gewässertypen und ihrer Entstehungsgeschichte über. Seinen Unterscheidungen zwischen tektonisch, vulkanisch oder eiszeitlich entstandenen Seen stellt er jeweils Fallbeispiele zur Seite. Besonders ausführlich berichtet er über die Gegebenheiten im und um den Laacher See in der Vulkaneifel; schon 2015 war er an einem Buch hierzu beteiligt (»Magie der Vulkaneifel«, WBG Theiss). Aber natürlich behandelt er auch den Bodensee, den größten See Deutschlands. Als nützlich erweist sich seine saubere Definition der verschiedenen Arten von Stillgewässern, darunter Tümpel und Pfützen als vorübergehend wasserführende Kleingewässer, sowie permanent wasserführende Gewässer wie Seen, Weiher, Teiche und Talsperren.

Von Absatzbecken bis Zellvakuole führt der Autor jeden nur denkbaren Stillgewässertyp auf und beschreibt ihn. Beim Lesen erfährt man etwa viel über die jahreszeitenabhängige Zirkulation eines Sees oder über seine vertikale und horizontale Gliederung in Teilbereiche. Wie Tiere im Wasser atmen, erklärt dieser Abschnitt genauso wie den Mechanismus, mit dem Seerosen über mehrere Meter hinweg ihre Teile am Seegrund mit Sauerstoff versorgen. Schließlich benennt der Biologe die diversen tierischen Wasserbewohner, erläutert ihre Lebens- und Fortbewegungsweisen, hebt dabei die enorme Bedeutung des Planktons hervor oder erläutert den Lebenszyklus von Libellen. Unterhaltsame Anekdoten und überraschende Informationen runden das Ganze ab – unter anderem stellt Kremer einen Bezug zwischen Pantoffeltierchen und U-Booten her.

Kremer wäre nicht der leidenschaftliche Pädagoge, als den man ihn kennt, wenn er es nicht auch in diesem Buch darauf anlegte, die Leser vom Sofa hinaus in die Natur zu ziehen. Sein Schwärmen von der besonderen Ruhe, die Stillgewässer gemeinhin umgibt, lässt die Planung der nächsten Reise sicherlich nicht unbeeinflusst. Trotz nicht weniger Fehler auf Grund schwachen Lektorats ein sehr empfehlenswertes Buch.

Die Rezensentin Birgit Kanz ist promovierte Biologin. Sie arbeitet als botanische Gutachterin für Planungsbüros in Naturschutz und Landschaftspflege sowie als freie Mitarbeiterin beim Forschungsinstitut Senckenberg.

Olaf L. Müller
ZU SCHÖN, UM FALSCH ZU SEIN
Über die Ästhetik in der Naturwissenschaft
S. Fischer, Frankfurt 2019
576 S., € 34,–



WISSENSCHAFTSTHEORIE
SCHÖNE EXPERIMENTE, ELEGANTE THEORIEN

Dürfen wir einer Naturerklärung umso mehr vertrauen, je mehr sie uns ästhetisch überzeugt?

Kürzlich hat die theoretische Physikerin Sabine Hossenfelder in ihrem Buch »Das hässliche Universum« energisch bestritten, dass ästhetische Kriterien in der Naturforschung etwas zu suchen haben. Jetzt behauptet der Wissenschaftsphilosoph Olaf L. Müller das glatte Gegenteil: Neue Experimente und Theorien üben ihm zufolge immer auch eine ästhetische Wirkung aus, überzeugen durch ihre »Schönheit« erst den Forscher selbst, dann die Zeitgenossen und setzen sich damit wissenschaftshistorisch durch.

Eingangs sammelt der Autor, der als Professor für Naturphilosophie und Wissenschaftstheorie an der Berliner Humboldt-Universität arbeitet, ein buntes Sammelsurium von Physikerzitaten. Während beispielsweise der britische Quantentheoretiker Paul Dirac die Schönheit einer Theorie für ein echtes Wahrheitskriterium hielt, wertete der US-Physiker Steven Weinberg sie bloß als ein Indiz dafür, dass es sich lohnt, der Sache weiter nachzugehen.

Unklar bleibt, was überhaupt die Schönheit einer Theorie ausmacht und wie sie wirkt. Anhand des »Mysterium Cosmographicum«, eines Frühwerks des Astronomen Johannes Kepler (1572–1630), behauptet Müller, Kepler sei hier als purer Ästhet vorgegangen, indem er die »idealen« – besonders symmetrischen – platonischen Körper so schön ineinanderstapelte, dass deren Umfänge ganz von selbst halbwegs den Bahnen der damals bekannten Planeten entsprachen. Doch tatsächlich orientierte sich Kepler an den empirischen Daten von Nikolaus Kopernikus (1473–1543), als er sein Modell des Sonnensystems bastelte. Zwar versuchte er die Schachtelung der platonischen Körper wirklich so lange umzuordnen, bis alles einigermaßen zu den vorhandenen Planetenumlaufdaten passte. Weil das aber letztlich nicht gelang, warf er später die antik-mittelalterliche Norm, wonach nur der Kreis als vollkommen und heilig galt, über Bord. Denn er hatte erkannt, dass die Planeten nicht Kreise beschreiben, sondern Ellipsen.

Schon dieses Beispiel zeigt, dass der Ästhetik bei der Theoriebildung bestenfalls eine heuristische Rolle zukommt – und dass sie manchmal sogar die Erkenntnis bremst. Man probiert mehr oder weniger »schöne«, das heißt kompakte und elegante, einfache und mächtige Modelle aus, bis sie einigermaßen (und manchmal überraschend gut) zu den Daten



IDEAS STUDIO / GETTY IMAGES / ISTOCK

Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**

12. 11. 2019 Redaktionsbesuch **Sterne und Weltraum**, Heidelberg
13. 11. 2019 Leserexkursion zum Forschungszentrum Jülich
8. 5. 2020 Leserexkursion zum Radioteleskop Effelsberg

Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von **Partnern** zum **Vorteilspreis**

11.–13. 10. 2019 Symposium »Bessere Menschen? Technische und ethische Fragen in der transhumanistischen Zukunft«, Fürth
1. 11. 2019 **Spektrum** LIVE-Veranstaltung »Die Wissenschaft vom Whisky«, Hamburg
5. 11. 2019 NeuroForum 2019 »Künstliche Intelligenz und Arbeitswelt«, Frankfurt a. M.
5. 11. 2019 Vortrag von Dr. Sabine Hossenfelder »Gibt es Dunkle Materie wirklich?«, Berlin
15.–16. 11. 2019 Stuttgarter Zukunftssymposium »Kollege KI – Arbeit 4.0«, Stuttgart
22. 11. 2019 **Spektrum** LIVE-Veranstaltung »Pasta, Pomodori, Parmigiano: Physik pur«, Frankfurt am Main
27. 11. 2019 DHV-Symposium »Maschinen statt Menschen? Chancen und Grenzen künstlicher Intelligenz aus Sicht der Wissenschaft«, Bonn
28. 11. 2019 **Spektrum** Schreibwerkstatt, Heidelberg
24. 1. 2020 **Spektrum** LIVE-Veranstaltung »Die Wissenschaft vom Whisky«, Offenbach

---

Digitales Produkt zum kostenlosen Download und weitere Vorteile

Download des Monats im Oktober: **Spektrum** KOMPAKT »Macht«
Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

---

Leserreisen

Vorteilspreis auf ausgewählte ornithologische Reisen bei birdingtours
travel-to-nature-Reisen nach **Namibia**, **Peru** oder **Costa Rica** zum Vorteilspreis
Einkaufsgutschein für den **Spektrum Shop** bei Buchung der Chile-, Polarlicht- oder Mexikoreise von Wittmann Travel e.K.

Weitere Informationen und Anmeldung:
Spektrum.de/plus

passen. Das ist das ganze Geheimnis der Schönheit in der Naturforschung, um das Müllers Buch in immer neuen Zyklen und Epizyklen rotiert.

Dabei ist Kepler nur das Vorspiel. Im Hauptteil des Buchs kommt der Autor auf sein eigentliches Steckenpferd zu sprechen, die von Goethe kontra Newton propagierte Farbenlehre. Johann Wolfgang Goethe (1749–1832) leugnete bekanntlich vehement die Erkenntnis Isaac Newtons (1643–1727), dass sich natürliches »weißes« Licht aus den Farben des Spektrums zusammensetzt. Diese Einsicht war zu Goethes Zeiten bereits 100 Jahre alt, vielfach belegt und unter Optikern unumstritten. Der Dichter nahm jedoch an, die Farben entstünden durch Trübung des reinen weißen Lichts, durch Wechselwirkung von hell und dunkel als farbige Schatten.

Der Autor stellt Newton und Goethe als Naturforscher auf eine Stufe, indem er fragt, was gewesen wäre, wenn Goethes Farbenlehre zuerst entstanden und Newtons Optik später dagegen angetreten wäre. Müller malt sich dafür allen Ernstes eine Theorie der »Dunkelstrahlen« aus, die dann vielleicht an Stelle der Lichtstrahlen zur Basis der Optik geworden wäre. Das spricht nicht nur der Empirie Hohn, sondern hat auch eine unfreiwillig komische Note. Denn es erinnert an eine Comicfigur aus den Micky-Maus-Heften: Daniel Düsentrieb erfindet unter anderem das Dunkellicht, eine rabenschwarze Glühbirne zur Verdunklung heller Räume.

Das umfangreiche Buch zitiert zahlreiche Beispiele aus Literatur, Malerei und Musik, die für eine Wesensverwandtschaft künstlerischer und naturwissenschaftlicher Tätigkeiten sprechen sollen. Doch den entscheidenden Unterschied nennt Müller nicht: Der ästhetische Wert eines Kunstwerks spricht für sich; der ästhetische Reiz einer wissenschaftlichen Theorie aber bedeutet gar nichts, solange er sich nicht an empirischen Daten bewährt.

Der Rezensent Michael Springer ist Physiker und Kolumnist bei »Spektrum der Wissenschaft«.

ZOOLOGIE

ANIMALISCHE UNTERSTÜTZUNG

Der Mensch profitiert auf vielfältige und oft überraschende Weise von seinen irdischen Mitbewohnern.

Seit Jahrtausenden nutzt der Mensch die besonderen Fähigkeiten von Tieren für sich. Die ersten Haushunde wurden vermutlich schon vor 15000 Jahren gezüchtet; später folgte die Domestikation vieler weiterer Tierarten. Sie dienten als Beschützer und Begleiter, Lieferanten von Nahrung und Bekleidungsmaterial oder als Lastträger. Heute kommen noch diverse andere Aufgaben hinzu: Hunde etwa führen Blinde, entdecken Verschüttete und erschnüffeln Diabetes; Ratten finden Landminen, ohne sie auszulösen, und spüren Tuberkuloseerreger in Speichelproben mit Hilfe ihres Geruchssinns auf – weitaus treffsicherer als Forscher, die hierfür Lichtmikroskope nutzen.

Mario Ludwig
TIERISCHE JOBS
Verblüffende Geschichten aus der Tierwelt
WBG Theiss, Darmstadt 2019
192 S., € 18,–



Der Biologe und renommierte Autor Mario Ludwig trägt zahlreiche bekannte und weniger bekannte Beispiele für solche »tierischen Jobs« zusammen. Dabei präsentiert er geschichtliche Anekdoten, etwa über Schwangerschaftstests mit Hilfe von Fröschen und medizinische Betäubung mit Zitterrochen, und gewährt einen Blick in heutige Anwendungen – etwa in die Drohnenabwehr mit Hilfe von Adlern. Auch die Weltraumhündin Laika und die Raben am Londoner Tower fehlen nicht. Dank zahlreicher Hintergrundinformationen gelingt es ihm, selbst Altbekanntem einen gewissen Neuigkeitswert zu verleihen. Unter anderem erläutert er, welche Eigenschaft(en) die jeweilige Tierart besonders qualifizieren, wie die tierischen Helfer ausgebildet werden und wie bedeutsam ihr Wirken für die Gesellschaft ist.

Die insgesamt 50 Kapitel erweisen sich als ansprechend illustriert und sind jeweils drei bis vier Seiten lang. Der unterhaltsame Schreibstil macht das Buch zur leichten und dennoch aufschlussreichen Lektüre, die sich für zwischendurch eignet. Den Begriff Job hat der Autor allerdings sehr weit gefasst. So kommt er auch auf Tiere wie Schildläuse und Purpurschnecken zu sprechen, deren einzige »Aufgabe« darin besteht, sich für die Herstellung von Farbstoffen zermahlen zu lassen.

Aspekte der Ethik und des Tierschutzes klingen in vielen Kapiteln am Rande an. Ludwig zeigt, dass selbst diejenigen tierischen »Arbeitnehmer«, die ihre Tätigkeiten überleben, in den seltensten Fällen artgerecht behandelt werden. Delfine beispielsweise, die für die Therapie behinderter Kinder herangezogen werden, müssen unter schlechten Bedingungen dahinvegetieren; überdies ist der Nutzen einer solchen Behandlung wissenschaftlich nicht belegt.

Leider berichtet der Autor häufig unkritisch über umstrittene Einsatzgebiete – etwa wenn Affen als Behindertenpfleger oder Kokosnuss-Erntehelfer dienen müssen. Zwar erwähnt er auch hier, dass Tierschutzorganisationen wenig begeistert sind. Der Fokus seines Werks liegt aber klar auf den erstaunlichen oder lustigen Merkmalen der Tiere.

Das Buch liefert zahlreiche kuriose Fakten, die sich gut im Smalltalk einbringen lassen. Außerdem vermittelt es einen Eindruck davon, auf welch überraschend vielfältige Weise der Mensch von seinen irdischen Mitbewohnern profitiert. Zart besaitete Tierfreunde sollten aber womöglich das ein oder andere Kapitel überspringen, etwa wenn es um Kriegselefanten, brennende Schweine oder Tiere als Drogenkuriere geht.

Die Rezensentin Elena Bernard ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

LESERBRIEFE

REANIMATION DER VENUS

Astronomen wollen am Beispiel der Venus mehr darüber in Erfahrung bringen, was Planeten lebensfreundlich macht. (»Der Exoplanet nebenan«, **Spektrum** August 2019, S. 52)

Oliver Harder, München: Das an der Verteilung von Einschlagkratern gemessene Alter der Venusoberfläche legt eine relativ zeitgleiche, geologisch nicht allzu weit zurückliegende Entstehungsgeschichte nahe, so als würde ein globales Schmelzen der Kruste zyklisch den ganzen Planeten runderneuern. Demnach könnte die im Artikel beschriebene kreisartige Formation der Artemis Corona auch initialer Hotspot eines solchen Ereignisses sein und weniger ein Hinweis auf einsetzende plattentektonische Prozesse. Dazu fehlt es der Venus wohl an innerer Strömungsdynamik. Schon die Abwesenheit eines Magnetfelds deutet auf eine geringe konvektive Aktivität hin. Möglicherweise ist diese relative Ruhe – verglichen mit dem turbulenten Erdinneren – unter anderem ihrer geringen Rotationsgeschwindigkeit geschuldet. Vielleicht genügt ja ein »kosmischer Schubs«, welcher der Venus rotativ auf die Sprünge hilft, um sie plattentektonisch zu (re)animieren.

STILLE STATT SPEKULATION

Die Physiker Sabine Hossenfelder und Stacy S. McGaugh erläuterten alternative Ideen zum Modell der Dunklen Materie. (»Gibt es die Dunkle Materie wirklich?«, **Spektrum** September 2019, S. 50)

Henrik Schachner, Murnau: »Dass einige Arten von Dunkler Materie ›superfluid‹ werden könnten« – will man so etwas wirklich lesen? Müssen wirklich allerwildeste Spekulationen sowie Zwischenergebnisse der Öffentlichkeit präsentiert werden? Oder sollte man nicht wenigstens so lange still sein, bis ein halbwegs belastbares Resultat gefunden ist? Na ja – Kosmologieartikel würden dann erst einmal nicht mehr erscheinen. **Spektrum** nimmt in meinem Bücherregal mittlerweile fast drei Meter ein. Vermutlich besteht ein halber davon aus solchen überdrehten Inhalten. Schade um den Platz!

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.



Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie Geschichte), Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang;
E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741,
E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Christine Kemmet, Dr. Susanne Lipps-Breda.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366,
E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,–; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,–; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,–. PDF-Abonnement € 63,–, ermäßigt € 48,–.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart,
IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder von ABSOLVENTUM MANNHEIM e. V., des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle, E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-741

Eine Anzeigenbuchung ist auch über iq media marketing gmbH möglich. Ansprechpartnerin: Anja Väterlein, E-Mail: anja.vaeterlein@iqm.de

Einem Teil der Auflage dieses Hefts liegt ein Werbung der Firma Plan International bei.

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 40 vom 1. 1. 2019.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2019 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



Johnnie, Walker

Wandern für die Menschheit – und manchmal auch mehr als das.
Eine Kurzgeschichte von Sven Klöpping

Ja, genau, das ist die Kaiserstraße. Die ist schön lang. Vorbei an der Uni, an verschiedenen Cafés und Einzelhändlern. Richtung Schloss. Mit jedem Schritt steigt mein Kontostand. Pro Kilometer in der Stadt kann man mit ungefähr fünf Credits rechnen. Das ist ein tolles System, finde ich. Ihr nicht? Na ja.

Wurde jedenfalls höchste Zeit, dass sich die Regierung etwas gegen diese ganze fatale Entwicklung überlegt hat. Über Generationen hinweg sind wir Originale immer bewegungsunfähiger geworden, und dann hat das »genetische Optimierungsprogramm« so richtig zugeschlagen.

Eine genetische Toleranzgrenze, die dem Ganzen Einhalt hätte gebieten können, gab es nicht. Nichts gegen Menschen mit verkümmerten Gliedmaßen, aber wenn fast alle so sind, dann kommt man schon ins Grübeln, gell? Die »Faulenzerjobs« sind mittlerweile zum Glück größtenteils von Androiden übernommen worden. Sollen die sich doch das Steißbein ins künstliche Gehirn sitzen!

Wir Originale haben jetzt etwas Besseres. Arbeiten entweder auf dem Bau – stark subventioniert, weil Roboter billiger sind. Oder wir werden bezahlt fürs Laufen. Ja, ihr habt richtig gehört. Damit der »fortlaufende« Bestand der Menschheit gesichert ist. Kein Scherz! Die Regierung bezahlt für jeden Kilometer. Die Höhe des Entgelts hängt ab von Geschwindigkeit, Steigungsgrad und Gelände. So verdiene ich mit einem Stadtspaziergang natürlich weniger, als wenn ich zum Beispiel einen Waldlauf durch hügeliges Gelände machen würde.

Wie das geht, zeige ich euch in diesem Retinavideo meiner implantierten WatchCam. Die filmt alles, was ich mache, wenn auch leider ohne Ton. Und jetzt, vor dem Upload, nehme ich noch einen Kommentar dazu auf. Eine Werbemaßnahme fürs Laufen, wenn ihr so wollt. Meistens schaut sich das fast niemand an. Aber diese Aufnahme wird ein Hit. Versprochen!

So, hier muss ich links abbiegen, da ist schon das Schloss ausgeschildert. Bis übermorgen muss ich 35 Kilometer hinter mich bringen, um alle Rechnungen bezahlen zu können, daher der schnelle Schritt. Der Chip in meiner Hüfte registriert genau, wie viel, wie schnell und wohin ich mich fortbewege.

Da rennt übrigens gerade Gustav vorbei, mit ihm rede ich manchmal über so Sachen wie Miete, aber heute hat er es eilig. Seit anderthalb Jahren mache ich das mit dem Laufen schon, habe bislang nur Positives erlebt. Man trifft viele neue Leute und kann sich austauschen.

Das Konzept der Regierung geht voll auf: soziale Interaktion gepaart mit körperlicher Fitness. So gleicht man die Folgen der genetischen Optimierung des 22. Jahrhunderts aus. Und sichert den Fortbestand der Menschheit. Damals wollten einige Konzerne den perfekten Menschen erschaffen. Es kam zu Mutationen, vererbten Gendefekten, ansteckenden Krankheiten – und vollends verkümmerten Muskeln natürlich.

Als es fast schon zu spät war, stoppte man den Wahnsinn und startete ein staatliches Programm für alle, die noch nicht betroffen waren. Genetische Optimierung wird jetzt streng kontrolliert, auch Eheschließungen und Geburten. Schließlich wollen wir nicht, dass sich unsere Kinder mit den Degenerierten vermischen oder diese Missgeburten sich weiter vermehren. Oder noch schlimmer: dass man uns irgendwann durch Roboter und Androiden ersetzt.

Tadaaa! Hier sehen wir jetzt endlich das Schloss. Es wurde vor einigen Jahren wundervoll restauriert. Ich setze mich auf eine der Bänke und genieße den Ausblick. Jetzt sieht man, wie verschiedene Androiden und Läufer vorbeikommen … und auch ein paar Degenerierte. Wie die sich vorwärtsquälen! Fast tun sie einem leid. Was sagt ihr? Ja klar, natürlich könnten sie mechanische Gehhilfen oder Robotergelenke in Anspruch nehmen, wir sind schließlich eine moderne und aufgeschlossene Gesellschaft. Aber viele sind dafür zu arm.

So, jetzt spule ich mal etwas schneller vor. Ich gehe noch ein paar Kilometer in lockerem Tempo spazieren und kaufe Utensilien für den Ausflug in den Schwarzwald (Grapefruitsaft, Snacks, Orangen). Im Wald werde ich richtig loslegen, Kameraden, freut euch schon mal drauf! Schön durchs Gelände marschieren, die heimische Natur genießen und dabei Credits einheimsen.

Zurück zu Hause stelle ich mich aber erst mal aufs Laufband. Auch das wird natürlich mitgezählt. Bei Stufe eins bekomme ich etwa vier Credits pro Kilometer. Nach sechs Kilometern habe ich keine Lust mehr, lege mich auf die Couch. Dreieinhalb Stunden TV-Faulenzerei, dann geht es per Elektroauto ins Murgtal. Das überspringe ich jetzt mal.

Ich hab mir vorgenommen, etwa vier Stunden durch die Gegend zu wandern. Das ergibt ungefähr 20 Kilometer der Kategorie »schwieriges Terrain«. Macht also um die 250 Credits. Davon kann ich schon mal einige meiner Rechnungen begleichen. In der Nähe von Forbach halte ich auf einem Rastplatz direkt am Stausee. Wie ihr seht, ist hier fast nichts los. Auf dem linken Pfad geht es einmal um den See und dann direkt in den Wald.

Man kann hier über alles nachdenken, die Natur genießen und gleichzeitig Credits sammeln, quasi ohne dass man es merkt. Es ist angenehmes Wanderwetter. Um die

20 Grad, leichter Wind. Da begegne ich gerade einem Afropärchen – auch Originale –, grüße sie freundlich. Hach, es ist schön, dass unsere Gesellschaft endlich gelernt hat, die althergebrachten Rassengrenzen zu überwinden und sich gegenseitig zu tolerieren und zu respektieren.

Das einzige Problem ist derzeit die Computerisierung, Androidisierung und genetische Selbstverstümmelung der Gesellschaft. Das wisst ihr sicher alle. Wie gesagt, nichts gegen Andros! Aber manchmal, da ist ganz tief in mir drin so ein Gefühl … na ja. Nicht aufregen! Positiv denken. Ich bin im Wald, das Wetter stimmt, also auf geht´s – Credits sammeln! Ich folge schmalen Pfaden, auf denen mir nur selten jemand entgegenkommt. Meistens Originale, die erkennt man ja leicht, nur ab und zu ein Andro.

Wir Menschen lieben unsere Natur, wollen immer wieder zu ihr zurückkehren. Andros können das nicht nachempfinden. Sie sehen nur klassifizierbare Kategorien von Pflanzen, Insekten, Wildkatzen, Dreck. Bei aller Kompatibilität mit den verschiedensten Computer- und Satellitensystemen wirken sie hier draußen erbärmlich und winzig, ihre Ports und Chips symbolisieren die ultimative Verzweiflung der technisierten Welt: unfähig, sich selbst treiben zu lassen, den Körper zu genießen. Immer nur analysieren, logisch denken! Ohne jede Emotion. Das ist doch einfach nur traurig.

Seht ihr die Buche da vorn? Hier biege ich nach rechts ab, weiter hinab ins Dickicht, das naturgeschützt auf seine Entdecker wartet. Schaut mal, wie schön die Sonne ihre Strahlen tanzen lässt, das zeige ich direkt mal in Zeitlupe. Jetzt fliegt über meinem Kopf ein Rotkehlchen. Wahnsinn, oder?

Vier Stunden durch die Gegend laufen, bei schwierigem Terrain – das bringt 250 Credits

Einige hundert Meter weiter höre ich etwas. Meine geübten Lauscher spitzen sich wie von selbst und ja … es ist das Stöhnen eines Liebespaars. Nach kurzem Zögern beschließe ich, mich ihnen zu nähern. Nicht dass ich ein Voyeur wäre – aber gewisse Dinge erregen einfach meinen Verdacht, müsst ihr wissen. Durch Gestrüpp, über Äste und Blätter schleiche ich, behutsam darauf bedacht, die beiden nicht in ihrer Ekstase zu stören, falls … Noch wenige Meter, dann habe ich sie erreicht … und was sehe ich da! Es sind tatsächlich Degenerierte!

Die verstecken sich glatt in dieser natürlichen Unschuld, um eine schändliche Sünde zu begehen! Ich hatte es schon vermutet, denn welcher normale Mensch sollte sich dabei verstecken? Das hier ist einfach eklig. Sie hat einen Roboterarm, er verstümmelte Beine. Das kann ich nicht dulden … darf ich nicht dulden! Einen Moment zögere ich, das sieht man auf dem Video deutlich, denn irgendwie sind wir ja alle Menschen, oder? Aber dann greife ich in meine Tasche, zücke das Jagdmesser, das ich für solche Fälle immer mit mir trage.

Warum eigentlich »Johnnie, Walker«, schießt mir da durch den Kopf. »Johnnie, Killer« wäre doch auch ein guter Nickname. Oder? Vielleicht in Zukunft.

Jetzt haben mich die beiden gesehen und schauen ganz erschrocken. Aber da beende ich ihren Liebesrhythmus mit schnellen, geübten Schnitten. Sorry, hier wird das Bild wackelig. Ich stoße sie von ihm herunter, rufe so etwas wie »Schande! Schande!«. Und da sackt er nach einem Hieb mit dem Knauf des Messers schon in sich zusammen wie ein altes Waschweib! Kein Wunder, seine Muskeln sind tatsächlich nur noch die allerletzten kläglichen Reste dessen, was uns Menschen einst auszeichnete.

Nun liegen beide reglos am Boden, und ich fotografiere den Tatort. Die Bilddatei schicke ich direkt an meinen Gauleiter, ich hab das Prozedere mit dem Handterminal gefilmt, falls euch auch mal so etwas passiert. Ich hatte da echt ein wenig Panik, die falschen Symbole zu betätigen. Der Gauleiter wird sich ab jetzt um alles kümmern, ein Aufräumkommando losschicken, Rechtliches klären, die Verwandten informieren.

Die Wanderung kann ich zu diesem Zeitpunkt natürlich nicht mehr fortsetzen, ich laufe den Weg zurück. Es ist schon so eine Sache, zwei meiner Mitmenschen umgebracht zu haben. Das ist irgendwie ein ganz komisches, kribbelndes Gefühl. Na ja.

Ich werde vom Ministerium jedenfalls eine fette Belohnung kassieren und mich sofort morgen in Behandlung begeben. PTBS oder wie nennt man das? Mich trifft es nie ganz so hart wie andere, aber belastend ist es schon, das muss ich zugeben.

Ich laufe also zurück zum Parkplatz, vorbei an einigen Wanderern, die mich entsetzt anstarren. Schaut euch mal diese Blicke an! Kein Wunder, ich bin ja über und über mit Blut bespritzt. Ich erkläre ihnen alles, ernte dankbare Blicke, und da applaudieren sogar ein paar. Jawohl, wenn es ums Bekämpfen der Plage geht, sind wir alle Originale.

Nach einem kräftigen Schluck Grapefruitsaft steige ich in mein Auto und fahre nach Hause. Dort habe ich der Behindertenhilfe erst mal ein paar Credits überwiesen. Irgendwie fühl ich mich ja doch ein wenig schuldig, gell. ◂

DER AUTOR

Sven Klöpping hat seit 1997 über 70 Sciencefiction-Storys in verschiedenen Magazinen veröffentlicht (wie »c't« und »Nova«). Außerdem ist er in der SF-Szene als Herausgeber und Redakteur engagiert. Derzeit arbeitet er in der Digitalisierungsbranche. Er lebt in Sachsen.

Das Novemberheft ist ab 19. 10. 2019 im Handel.

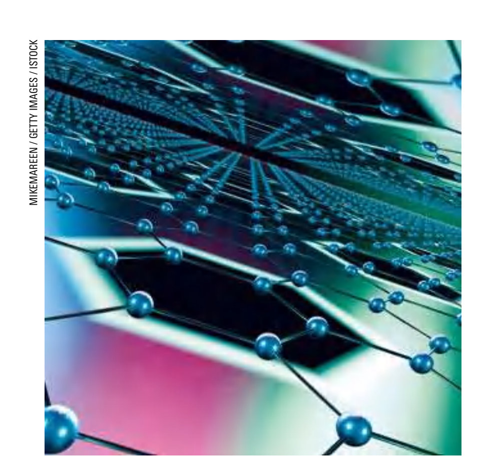
VORSCHAU



HADZI3 / GETTY IMAGES / ISTOCK; STRAHL: TEEKID / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

AUF DER SPUR DER KOSMISCHEN BESCHLEUNIGER

In manchen Regionen des Alls erhalten Teilchen enorme Energien – beispielsweise in den Kernen aktiver Galaxien. Ein neues Observatorium soll die Geheimnisse dieser kosmischen Beschleuniger lüften: Es weist sehr energiereiche Gammastrahlung nach, die aus den ungestümsten Gegenden des Universums zur Erde dringt.



MIKEMAREEN / GETTY IMAGES / ISTOCK

SCHICHT UM SCHICHT

Physiker entdecken immer mehr Stoffe, die nur eine einzige Atomlage dick sind und ungewöhnliche Merkmale aufweisen. Indem sie diese Schichten übereinanderlegen, entstehen ultradünne Strukturen mit einzigartigen Eigenschaften, welche die Nanowissenschaft revolutionieren könnten.



CHIOCIOLLA / GETTY IMAGES / ISTOCK

FASZINIERENDER TEE

Teepflanzen gehören zu den bedeutendsten Nutzgewächsen der Menschheit, doch über ihre Herkunft ist erstaunlich wenig bekannt. Auch inwieweit Tee eventuell Krebserkrankungen verhindern kann, ist alles andere als klar. Mit neuen Techniken und besseren Studiendesigns versuchen Forscher, Antworten zu finden.



ARCHIV DER FAMILIE THIESSEN; MIT FRDL. GEN. VON DIETER HOFFMANN

DIENER VIELER HERREN

Sowohl unter dem NS-Regime als auch in der DDR gehörte der Physikochemiker Peter Adolf Thiessen zu den einflussreichsten Wissenschaftsstrategen. Wie konnte er sich an so unterschiedliche Systeme anpassen? Eine Spurensuche.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?
Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!





ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,– inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,–), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



KOMBIABO:

Für nur € 6,–/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



Spektrum PLUS:

Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserexkursionen und Redaktionsbesuche.

Jetzt bestellen!

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/abo

Das wöchentliche digitale Wissenschaftsmagazin

App und PDF
als Kombipaket im Abo.
Jetzt bestellen!

Spektrum der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR 34
22.08 2019

> Hungrige Singvögel schlafen auf »Standby«
> Falsche Nachrichten – falsche Erinnerungen
> Aggressivere Spinnen trotzen Stürmen

TITELTHEMA: NEUES GRAVITATIONSWELLENSIGNAL
Schwarzes Loch frisst Neutronenstern
In einer weit entfernten Galaxie könnte ein Schwarzes Loch einen Neutronenstern verschlungen haben. Für die Menschheit wäre das eine Premiere – aber es sind noch viele Fragen offen.

RAKETENPROJEKT »SKYFALL«
Was hinter der russischen Nuklearexplosion stecken könnte

TROPENFIEBER
Fünf Fragen zu Malaria

DUNKLE MATERIE
DAMA gegen den Rest der Welt

Mit ausgewählten Inhalten aus nature

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.



www.spektrum.de/abonnieren

UNSPLASH / KAZUEND (https://unsplash.com/photos/2KXEb_8G5vo)